

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

ALEXANDRE MASSANEIRO LUCIANO

SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO PARA ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE UTILIZAÇÃO DO
CORREDOR BRT – *EIXO NORTE-SUL* DE CURITIBA

Joinville
2016

ALEXANDRE MASSANEIRO LUCIANO

SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO PARA ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE UTILIZAÇÃO DO
CORREDOR BRT – *EIXO NORTE-SUL* DE CURITIBA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Transportes e
Logística, no curso Engenharia de Transportes
e Logística da Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Prof. Dr. Cassiano Augusto Isler

Joinville
2016

RESUMO

O corredor de BRT na cidade de Curitiba, o primeiro a ser implantado no mundo, surgiu como solução para os problemas de mobilidade urbana. Apesar da cidade ser referência no planejamento urbano e de transportes, o seu crescimento tem causado grandes problemas na mobilidade e mudanças têm sido planejadas dado que o sistema de BRT tem se aproximado da saturação. A mudança de maior impacto está relacionada com a implementação de uma linha de metrô no local do corredor de BRT no eixo Norte-Sul da cidade. Com essa mudança, o atual corredor perderá sua função de circulação exclusiva de ônibus, sendo necessário estudos de requalificação urbana nos trechos em que será substituído pela linha de metrô. Este trabalho tem o objetivo de analisar alternativas de utilização do corredor de BRT da cidade de Curitiba sob a hipótese de transferência de usuários para o futuro sistema de metrô. Após a estimativa de uma matriz Origem-Destino entre pontos de contagens em quatro bairros da região central da cidade, foram realizadas simulações de tráfego com o software SUMO pela modelagem do sistema atual e proposta de abertura das faixas de tráfego do BRT para a circulação de automóveis em diferentes sentidos. Embora os resultados obtidos sugerirem que a abertura das vias do BRT para automóveis resultam em diferenças estatísticas em alguns cenários em relação ao tempo médio de espera, tempo médio de viagem e velocidade média, as pequenas reduções nos valores absolutos dessas medidas podem não justificar a preferência do modo individual em relação ao uso alternativo do espaço urbano.

Palavras-chave: BRT. Curitiba. Simulação de Tráfego. SUMO. Equilíbrio do Usuário.

ABSTRACT

The first BRT system of the world in the city of Curitiba became a solution to its urban mobility problems. Although the city is widely known as a reference on urban and transport planning, its growth is causing severe mobility problems such that some alterations of its system are being planned. The major project to deal with these problems is a subway system to substitute the current BRT over its North-South axis. This project will probably deactivate the bus operation such that a requalification project of its infrastructure is required. The goal of this study is to assess the alternatives of use of the BRT corridor in Curitiba under the hypothesis of users being transferred to the future subway system. The current traffic situation has been simulated using the software SUMO after estimating an OD matrix among intersection points over four neighborhoods in the city center, and other scenarios were modeled considering the traffic of private vehicles over the BRT system in different directions. From this, only few scenarios in which the BRT lanes are opened to the vehicles have significant statistical difference considering the average waiting time, the average travel time and average speed, suggesting that the small reductions of the absolute values of these measures may not justify the preference to the individual mode of transport over other alternatives to the urban region, such as a linear park.

Keywords: BRT. Curitiba. Traffic Simulation. SUMO. User Equilibrium.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao apoio e amor incondicional de meus pais e meu irmão. José João Luciano(*in memorian*), Doris e Leonardo, vocês são fundamentais para minha vida.

Agradeço também ao apoio irrestrito, paciência e conselhos do meu orientador, Prof. Cassiano Augusto Isler. Esse trabalho só existe graças a sua infinita ajuda. Sei que é uma amizade que levo pra vida.

À minha família, que é fundamental em cada passo. Jamais esquecerei cada ajuda fornecida durante o período universitário. Os momentos na tenda foram os melhores da minha vida. Ao Sandro por ser um segundo pai e ter sido tão importante na jornada.

Aos meus amigos que são imprescindíveis: Carnaval Lepo-Lepo (Ademar, Cristiano, Felipe e Lucas), Pokémon Go (Alexsandro, Gilney, Ian, Igor, Jonas, Júlio, Kim, Leonardo, Luca, Marcelo, Marcus, Rafael e Sérgio), aos amigos empreendedores (Eduardo, Gabriel e Gustavo), aos parceiros (Alan, Vagner e Ezequias), aos grandes amigos surgidos pela UFSC (Fernando, Luiza, Grazi, Rogério, Marcus, German, Stefano, Nicolas, Lucas Araújo, Rafa Furtado, Guilberto e Ghislayne), ao Catuabeiros F.C (André, Bruno, Diogo's, Eduardo, Eric, Gabriel, Guilherme, Calvin, Leo, Lucas, Matheus B. e S., Paulo, Pedro, Rafael, Uriel e Yan), ao João Costa (Joãozinho) pelas infinitas gargalhadas, ao Fabrício pelos grandes momentos e Vitor Fabris pela longa amizade e a todos que foram importantes nessa grande trajetória.

Aos meus padrinho de batismo, Rui e Aracy e de crisma, Gaetano e Ana Paula, pelo amor demonstrado.

Ao Marcos Reis e Ana, que além das inúmeras horas de ajuda e conversas, me ajudaram a estar aqui com tanto ensino e sabedoria.

Aos amigos Jair, Eduardo, Flávio e Carlos por me guiarem ao caminho correto, um caminho de luz, mesmo num período de escuridão.

Ao Inovapark, por acreditar em um projeto e fornecer tanto conhecimento.

À UFSC: professores e servidores. Todos contribuíram para esse projeto. Em especial as professoras: Christiane Wenck Nogueira Fernandes e Silvia Lopes de Sena Tagliapietra por toda a orientação e disponibilidade. Ao professor Rodrigo Castelan Carlson por ter iniciado a orientação deste trabalho e ao professor Diogo Nardelli Siebert pela atenção e carinho ao permitir o acesso ao Laboratório de Computação Científica.

*"Nada debilita mais a
inteligência do que a obstinação
orgulhosa na astúcia
fracassada".*

Olavo de Carvalho

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Corredor de BRT da Linha Santa Cândida/Capão Raso	10
Figura 2 – Modelos de apoio a tomada de decisão na Engenharia de Tráfego .	13
Figura 3 – Relação Fundamental de Tráfego: Velocidade x Fluxo	16
Figura 4 – Relação Fundamental de Tráfego: Velocidade x Densidade	16
Figura 5 – Relação Fundamental de Tráfego: Fluxo x Densidade	17
Figura 6 – Modelo de Seguimento Veicular	18
Figura 7 – Gráfico para definição de <i>warm-up period</i>	31
Figura 8 – Características de um BRT Completo	37
Figura 9 – Corredor de BRT Completo - Linha Verde de Curitiba	38
Figura 10 – Pontos de contagem na cidade de Curitiba e o corredor de BRT, eixo Norte-Sul, em destaque	41
Figura 11 – Pontos de contagem dos 4 bairros e o corredor de BRT	41
Figura 12 – Rede de Tráfego no simulador SUMO	42
Figura 13 – Simulação de Curitiba - Centro	43
Figura 14 – Coeficiente angular dos números de veículos na simulação	45
Figura 15 – Velocidades Médias de cada cenário em ordem: Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4	49
Figura 16 – Tempo Médio de Espera de cada cenário em ordem: Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4	50
Figura 17 – Tempo Médio de Viagem de cada cenário em ordem: Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4	51
Figura 18 – Velocidades Médias de cada cenário e do obtido pela prefeitura . .	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Regressão linear em relação aos tempos de simulação	45
Tabela 2 – Resultados da simulação para cada cenário em relação ao Tempo Médio de Espera	45
Tabela 3 – Número de Replicações necessárias para Tempo Médio de Espera	46
Tabela 4 – Dados majorados da prefeitura de Curitiba	47
Tabela 5 – Resumo dos dados de Velocidade Média	52
Tabela 6 – Resumo dos dados de Tempo Médio de Espera	52
Tabela 7 – Resumo dos dados de Tempo Médio de Viagem	52
Tabela 8 – Análise de Welch em comparação com cenário 1	53
Tabela 9 – ANOVA entre os cenários em termos do Tempo Médio de Espera .	54
Tabela 10 – ANOVA entre os cenários em termos de Tempo Médio de Viagem .	54
Tabela 11 – ANOVA entre os cenários em termos da Velocidade Média	55
Tabela 12 – Valores Absolutos e Percentuais em relação ao cenário 1	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	11
1.2	Organização do Texto	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Abordagem macroscópica de fluxo de tráfego	13
2.1.1	Relações Fundamentais de Tráfego	14
2.1.2	Diagrama Fundamental de Tráfego	15
2.2	Abordagem mesoscópica de fluxo de tráfego	17
2.3	Abordagem microscópica de fluxo de tráfego	17
2.4	Simulação de Tráfego	21
2.4.1	Simulação macroscópica	22
2.4.2	Simulação microscópica baseada em agentes	23
2.5	Análise de simulações	24
2.5.1	Sistema terminal	24
2.5.1.1	Análise do número de Replicações	25
2.5.1.2	Análise Estatística dos Resultados	30
2.5.2	<i>Warm-up period</i>	30
2.6	Simulador de tráfego SUMO	31
2.6.1	Modelo de Krauss	31
2.6.2	Rede de Tráfego	32
2.7	Modelo 4 Etapas	33
2.8	Sistemas BRT	36
2.9	Indicadores de Desempenho de Tráfego	38
2.10	Requalificação urbana	39
3	MÉTODO	40
3.1	Aquisição de Dados	40
3.2	Matriz Origem-Destino	42
3.3	Simulador SUMO	42
3.4	Simulação e Tratamento de Dados	44
4	RESULTADOS	47
4.1	Análise de Welch	53
4.2	ANOVA	54
5	CONCLUSÕES	56

REFERÊNCIAS 58

1 INTRODUÇÃO

A concentração da população em grandes aglomerados urbanos tem causado impactos significativos na vida cotidiana das pessoas, entre eles os efeitos da falta de capacidade de absorção da demanda com nível de serviço satisfatório, considerando os modos coletivos e individuais de deslocamento (COELHO, 2009).

A lentidão causada pelos congestionamentos resulta em prejuízos financeiros, perda de tempo, favorece o surgimento de doenças, e degrada o meio ambiente. Assim, de forma geral, toda a sociedade pode ser influenciada pela ineficiência dos sistemas de transportes (RESENDE; SOUSA, 2009).

Em concordância com Kutz (2004), a flutuação de demanda e dos padrões de viagens exigem cada vez mais o planejamento da infraestrutura de tráfego para redução dos gargalos, assim como medidas na gestão viária e de redução de custos para atendimento da demanda e expansão da capacidade dos modos de transportes.

O planejamento dos transportes consiste de múltiplos agentes, como o número de sistemas diferenciados e seus custos, a acessibilidade a eles e a velocidade dos veículos relacionados a um modo de transporte. Sistemas com maior acessibilidade geralmente implicam em uma menor velocidade operacional, tal que a reorganização dessas relações pode aumentar a capacidade em curto prazo (KUTZ, 2004).

Curitiba é uma cidade que segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE (2015) possui população de 1.751.907 habitantes. Na região metropolitana, composta por 26 municípios, há uma população total de 3.502.804 habitantes, com a taxa anual de crescimento da cidade de 3,02%, acima da média nacional de 1,53% (CURITIBA, 2014).

Nesse cenário, os congestionamentos na cidade são recorrentes e o trânsito apresenta lentidão maior que em outras cidades do seu porte como Belo Horizonte. Como o Centro de Controle Operacional (CCO) de Tráfego em Curitiba é recente e a cidade não possui metrô, o sistema de transporte da cidade precisa ser melhorado mesmo sendo uma referência na oferta de serviços de transporte público (FÉLIX, 2013).

Conforme Coelho (2009), uma redução da velocidade média praticada pelos veículos tem sido observada para as mesmas distâncias percorridas, elevando os tempos de viagem, o gasto energético e a emissão de poluentes.

A cidade de Curitiba possui um sistema de transporte coletivo por ônibus que é referência mundial na qualidade da oferta de serviços aos usuários. Um sistema de Bus Rapid Transit (BRT) foi implantado na linha de maior quantidade de passageiros

implantação de um metrô - na linha Santa Cândida/Capão Raso - é uma estratégia compatível com as demandas do município, apesar dos altos custos incorridos. Segundo dados do projeto idealizado pelo Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC, 2016a), mais de 750 mil pessoas utilizam os sistemas de ônibus nesse trecho diariamente, em ambos os sentidos, e o tempo de viagem após implementação do projeto seria reduzido em aproximadamente 26 minutos por sentido, dos atuais 55 minutos pelo ônibus para 29 minutos através do metrô.

A implantação do sistema de metrô na cidade tem o objetivo de aumentar a capacidade de transporte, diminuir a poluição, atrair mais pessoas para o transporte público coletivo e reduzir os tempos de viagem. Entretanto, com a implantação do metrô em Curitiba, os atuais corredores de BRT ficariam desativados, uma vez que abaixo deles operaria o metrô no mesmo traçado (IPPUC, 2016a).

Nesse sentido, surge a necessidade de propostas para reorganização do espaço urbano atualmente utilizado pelo modo ônibus, cujos usuários serão transferidos em sua maioria para o sistema metroviário.

A busca por soluções para mudança de função de infraestrutura já é estudada em outros locais, como na cidade de São Paulo. Segundo Biderman (2008), há uma proposta de transformação do Elevado Costa e Silva, o Minhocão, em um parque urbano com uso compartilhado de transporte público, ciclistas e pedestres, enquanto Silva (2007) propõe uma melhora acústica e urbanística mantendo o tráfego local.

Outra estrutura é a *High Line* em Nova York, pela implantação de um parque linear em substituição a uma linha férrea elevada que existia no local. O parque obteve êxito na requalificação urbana dos bairros no seu entorno, servindo como modelo para reuso e adaptação de infraestruturas (JARDIM, 2012).

1.1 Objetivos

Nesta seção são apresentados os objetivos geral e específicos deste trabalho.

Objetivo Geral

Analisar alternativas de utilização do corredor de BRT da cidade de Curitiba (PR) sob a hipótese de transferência do sistema atual para o futuro sistema de metrô.

Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para atingir o objetivo geral são:

1. Compreender a operação do sistema de BRT e a interação com o sistema viário da cidade de Curitiba;
2. Caracterizar os fluxos de tráfego e a rede viária em bairros da região central da cidade de Curitiba;
3. Modelar o tráfego através de um modelo de simulação e alocação e comparar as medidas de desempenho do sistema sob diferentes alternativas de utilização das atuais faixas do BRT para o tráfego de automóveis.

1.2 Organização do Texto

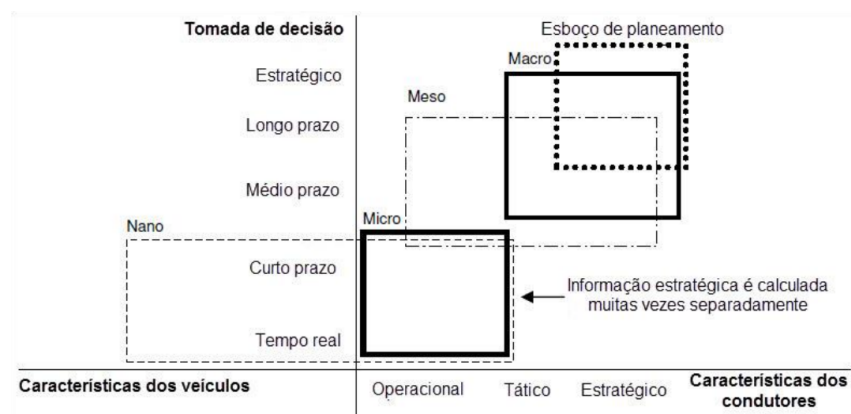
Após esta Introdução, no Capítulo 2 é apresentada a revisão teórica que aborda os conceitos fundamentais de tráfego e de simulação, a implantação de sistemas BRT, os indicadores de desempenho de tráfego e estratégias de requalificação urbana existentes na atualidade. O método utilizado para atingir os objetivos indicados é mostrado no Capítulo 3, bem como o detalhamento da estratégia de obtenção da matriz OD e da simulação da rede de tráfego da região central de Curitiba. No Capítulo 4 são indicados os resultados e no Capítulo 5 são apresentadas conclusões sobre os resultados apresentados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo contém um resumo das abordagens macroscópicas, mesoscópicas e microscópicas para modelagem do fluxo de tráfego de veículos em uma via urbana. São apresentados os respectivos modelos matemáticos, destacando-se a aplicação de cada tipo de abordagem. Além disso, o Modelo 4 etapas é brevemente descrito, bem como as características de softwares de simulação, etapas de simulação e exemplos de requalificação urbana.

Segundo Vanderschuren (2006), o modelo macroscópico auxilia a tomada de decisão estratégica ou tática, enquanto o modelo microscópico fornece informações para decisões operacionais conforme esquematizado na Figura 2.

Figura 2 – Modelos de apoio a tomada de decisão na Engenharia de Tráfego



Fonte: Vanderschuren (2006)

A primeira abordagem de modelagem de fluxo de tráfego foi relacionada à teoria das probabilidades, com os modelos macroscópicos relacionando variáveis de fluxo e velocidade. A partir dessa abordagem foram propostos outros modelos sob diferentes perspectivas como: "car following", teoria das ondas de tráfego e aqueles baseados em teoria das filas. Esses modelos podem ser classificados em determinísticos ou estocásticos, subdividindo-se em macroscópicas, microscópicas e mesoscópicas (COELHO, 2009).

2.1 Abordagem macroscópica de fluxo de tráfego

Segundo Coelho (2009) a teoria de fluxo de tráfego tenta descrever de uma maneira realista o comportamento do tráfego através das leis da física, considerando

o sistema uniforme e homogêneo pois a maioria dos elementos tem comportamento previsível.

2.1.1 Relações Fundamentais de Tráfego

As relações fundamentais de tráfego regem os princípios dos estudos de tráfego sob a perspectiva macroscópica considerando as variáveis de fluxo, velocidade e densidade, utilizados para caracterizar os aspectos do tráfego e permitindo avaliação do fluxo de veículos (DNIT, 2006).

Ainda segundo o DNIT (2006) as relações fundamentais são baseadas em fluxos contínuos, e isto permite que sejam construídos gráficos que representam satisfatoriamente o comportamento observado.

Define-se o fluxo ou volume de tráfego como o número de veículos que passam por uma seção de uma via durante uma unidade de tempo. Geralmente são usadas as unidades: veículos/hora (vph) ou veículos por dia (vpd) (DNIT, 2006).

O volume de tráfego em geral é definido em unidades de carro de passeio equivalentes (*ucp*), tal que os diferentes tipos de veículos (caminhões, ônibus e motos) são convertidos para essa unidade única. É como se, por exemplo, um veículo se comportasse como uma fração ou como múltiplos veículos de passeio.

A relação fundamental de tráfego no nível macroscópico pode ser representada por:

$$q = v \cdot k \quad (2.1)$$

onde k = densidade (veic/km);

q = fluxo médio no trecho em (veic/h);

v = velocidade média no trecho (km/h).

A velocidade é, dentre as características essenciais do tráfego, uma das mais complexas para se definir, dada pela relação entre o espaço percorrido (x) por um veículo e o tempo (t) gasto em percorrê-lo (DNIT, 2006).

$$\partial v = \frac{\partial x}{\partial t} \quad (2.2)$$

Pela relação fundamental de tráfego a velocidade também pode ser definida pela relação entre fluxo e densidade.

$$v = \frac{q}{k} \quad (2.3)$$

Por outro lado, a densidade é caracterizada pelo número de veículos por unidade de comprimento da via, podendo ser obtida pela equação (2.1) (DNIT, 2006).

$$k = \frac{q}{v} \quad (2.4)$$

O manual do DNIT (2006) fornece alguns outros conceitos fundamentais para os estudos de tráfego:

- Espaço: distância entre veículos sucessivos em relação a um mesmo referencial;
- *Headway*: tempo transcorrido entre a passagem de dois veículos sucessivos por uma seção de controle de tráfego;
- v_f : velocidade de fluxo livre, isto é, a velocidade desejada pelo motorista ou a velocidade máxima permitida;
- k_j : concentração máxima, correspondente à situação de completo congestionamento;
- q_{max} : máximo fluxo que pode ser atendido por uma via ou trecho de via;
- v_o : velocidade ótima, quando o fluxo é equivalente a q_{max} ;
- k_o : concentração ótima, quando o fluxo é equivalente a q_{max} .

2.1.2 Diagrama Fundamental de Tráfego

As primeiras observações de fluxo de tráfego em rodovias foram realizadas por Bruce D. Greenshields em 1933, com testes através de métodos de medição por fotos para análise de fluxo, densidade e velocidade (KUHNE, 2008).

Em seu estudo Kuhne (2008) observa que Greenshields postulou uma relação linear entre velocidade e densidade dada por:

$$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_o} \right) \quad (2.5)$$

Como variável dependente a concentração na via, tem-se:

$$k = k_o \left(1 - \frac{v}{v_f} \right) \quad (2.6)$$

A partir da hipótese linear de Greenshields aplicada à relação fundamental de tráfego é possível afirmar que o fluxo é dado por:

$$q = v_f \cdot k - \frac{v_f}{k_o} k^2 = k_o \cdot v - \frac{k_j}{v_f} \cdot v^2 \quad (2.7)$$

Derivando o fluxo e igualando a zero, é possível maximizar a função para encontrar o fluxo máximo como mostrado a seguir:

$$\left. \frac{\delta q}{\delta k} \right|_{k \rightarrow 0} = 0 \Rightarrow v_f - 2 \cdot \frac{v_f}{k_o} \cdot k = 0 \quad (2.8)$$

A conclusão é de que o fluxo é máximo nas seguintes condições:

$$k = \frac{k_o}{2} \quad \text{e} \quad v = \frac{v_f}{2} \quad (2.9)$$

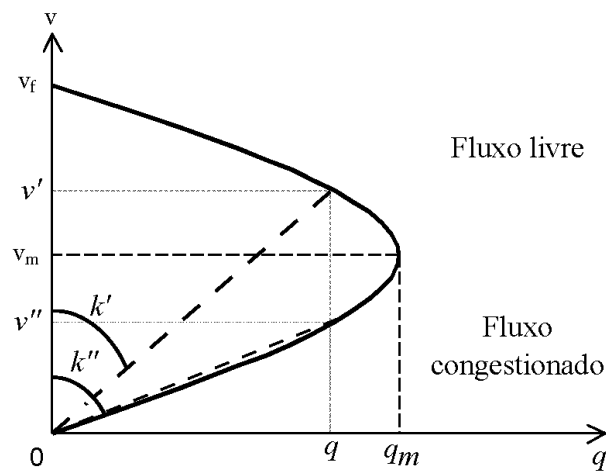
Logo, a capacidade (C) é igual ao fluxo máximo, sob hipótese linear dada por:

$$C = q_{max} = k \cdot v = \frac{k_o \cdot v_f}{4} \quad (2.10)$$

A partir de uma velocidade de fluxo livre (v_f), aumentando o fluxo de veículos numa seção de via, a velocidade média dos veículos diminui até a densidade ótima (k_o), que corresponde ao fluxo máximo (q_{max}) ou a capacidade da via (DNIT, 2006).

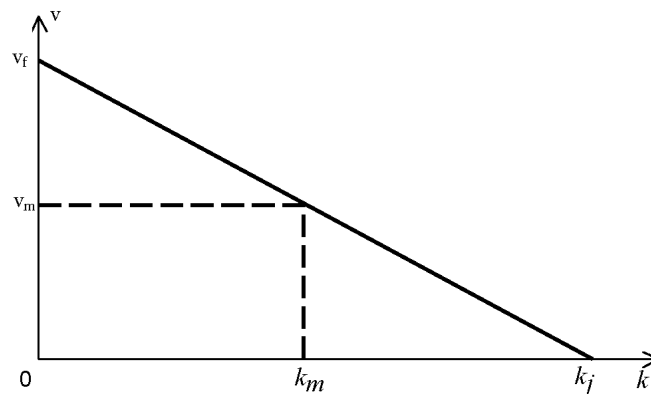
Graficamente, essas relações podem ser representadas conforme indicado nas Figuras 3, 4 e 5.

Figura 3 – Relação Fundamental de Tráfego: Velocidade x Fluxo



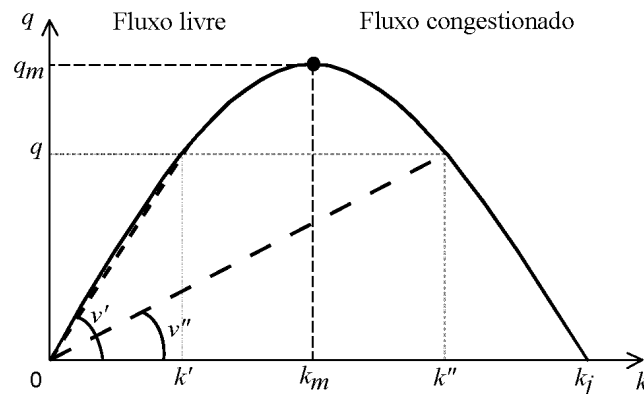
Fonte: baseado em DNIT (2006).

Figura 4 – Relação Fundamental de Tráfego: Velocidade x Densidade



Fonte: baseado em DNIT (2006).

Figura 5 – Relação Fundamental de Tráfego: Fluxo x Densidade



Fonte: baseado em DNIT (2006).

2.2 Abordagem mesoscópica de fluxo de tráfego

Os modelos mesoscópicos buscam representar o deslocamento de um grupo de veículos, chamado de pelotão, assumindo mesmo comportamento no deslocamento ao longo da via. Geralmente os pelotões ocorrem após as saídas de interseções semaforizadas, podendo também ser causados por lentidão de um veículo ou mesmo um ônibus parado para transbordo de passageiros (COELHO, 2009).

Segundo Coelho (2009) os pelotões são formados a partir de interseções ou de veículos mais lentos. Os pelotões possuem duas abordagens: espacial ou temporal. Na primeira, a posição e o comprimento físico do pelotão é considerado, enquanto na segunda abordagem, o fator mais importante é a distribuição temporal do fluxo de veículos, que é mais indicada para representação do fluxo para planos semafóricos.

A dispersão de pelotões, segundo Payne (1979) ocorrem pela diferença de velocidade dentro do próprio pelotão, e ainda que a ausência de interferência entre veículos do pelotão propiciam que veículos possuam velocidades constantes e ultrapassem uns aos outros.

Ainda segundo Coelho (2009), os modelos mesoscópicos combinam a eficiência computacional dos modelos macroscópicos com a oportunidade de se estabelecer medidas de desempenho para veículos individuais, como emissões, distribuição de probabilidade de aceleração e tempo de viagem.

2.3 Abordagem microscópica de fluxo de tráfego

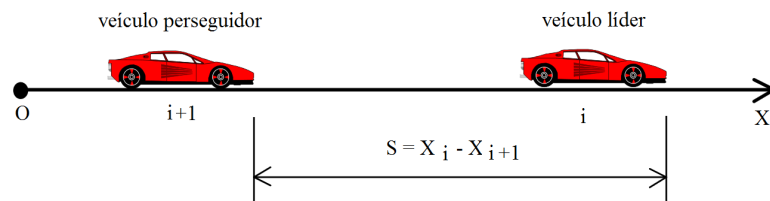
No nível microscópico de modelagem de tráfego todos os componentes são representados detalhadamente, possibilitando a representação do comportamento de cada veículo no sistema (FARINHA, 2013).

O fluxo de tráfego é constituído de condutores, veículos, vias e o ambiente ao redor. As formas de agir desses agentes não são constantes, com flutuações de características e de operação, tais como: tempo de reação e percepção, problemas com manutenção de veículos, acidentes que reduzem a capacidade da via por interdição temporária e condições climáticas (COELHO, 2009).

A partir dessa modelação individual, existe uma interação veículo-veículo. Essas "leis de perseguição"(car-following) são definidas como o estímulo e reação dos condutores de veículos subsequentes. Há uma ação provocada pelo veículo da frente em um determinado tempo, e em resposta a essa ação, ocorre uma reação do condutor do veículo de trás, como desaceleração (COELHO, 2009).

A modelagem microscópica busca descrever a dinâmica individual de um veículo, bem como a posição e velocidade dos veículos próximos. Os modelos considerados nesta revisão para descrever o seguimento veicular consideram a via com apenas uma faixa de tráfego. As posições e velocidades instantâneas são descritas respectivamente por x_i e v_i , aonde o índice i está associado a um veículo no fluxo de tráfego (KRAUSS, 1998).

Figura 6 – Modelo de Seguimento Veicular



Fonte: Silva (2007).

Segundo Krauss (1998), pela teoria de seguimento veicular, a mudança de velocidade só é realizada se a velocidade instantânea não coincide com a velocidade desejada (V_{des}), a qual é determinada pelas condições de segurança, restrições legais, entre outras. Um modelo que possibilita descrever a velocidade instantânea de um veículo considera a variação da velocidade média v_i em relação à velocidade desejada V_{des} por unidade de tempo (τ), definido como um modelo de "dinâmica veicular". Os modelos indicados nesta revisão diferem pela escolha de V_{des} e τ .

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{V_{des} - v_i}{\tau} \quad (2.11)$$

Conforme Krauss (1998) quase todos os modelos de seguimento veicular são baseados na premissa de que a movimentação do veículo (i) é dependente exclusivamente do veículo predecessor ($i + 1$). Para um regime permanente, a velocidade desejada de um veículo é a mesma do veículo do carro que está seguindo, tal que:

$$\frac{\partial v_i(t)}{\partial t} = \frac{v_{i+1}(t) - v_i(t)}{\tau} \quad (2.12)$$

A equação da dinâmica veicular foi primeiramente proposta por Pipes (1953) derivada em relação ao espaçamento entre dois veículos, que aumenta linearmente com a velocidade. Resolvendo a equação diferencial, constata-se que não há aglomeração de veículos pois a velocidade é igual para todos os veículos na condição de regime permanente (KRAUSS, 1998).

Chandler, Herman e Montroll (1958) afirmam que o estado permanente pode incluir um termo de tempo de reação (∂T), resultando em uma espera dada pela equação diferencial a seguir.

$$\frac{\partial v_i(t)}{\partial t} = \frac{v_{i+1} - v_i}{\tau} \Big|_{t+\Delta T} \quad (2.13)$$

O tempo de espera do modelo desestabiliza-se quando a relação $\Delta t/\tau$ é muito grande, tal que o limite de estabilidade é observado geralmente quando $\Delta t/\tau = 0,5$. Apesar de aglomerações espontâneas serem modeladas, a aplicação do modelo é bastante restrito devido à dinâmica independente da distância entre os veículos, que acarreta em dois problemas de acordo com Krauss (1998):

- Há colisões de veículos;
- Não há dependência da densidade na dinâmica veicular e a relação velocidade-densidade não pode ser derivada a partir desse modelo.

Esse problema foi superado por Gazis, Herman e Rothery (1961 apud KRAUSS, 1998), que introduziram uma dependência através da relaxação do tempo, incluindo uma sensibilidade sobre a distância dos veículos.

$$\frac{\partial v_i(t)}{\partial t} = \alpha \frac{v_{i+1} - v_i}{x_{i+1} - x_i} \Big|_{t-\Delta t} \quad (2.14)$$

onde α = coeficiente de relaxação;

v_{i+1} = velocidade do veículo sucessor (m/s);

v_i = velocidade do veículo predecessor (m/s);

x_{i+1} = posição do veículo sucessor (m);

x_i = posição do veículo predecessor (m);

k_{cong} = densidade de congestionamento ($veic/m$).

Desde que o termo da direita seja o tempo derivado de $(\alpha \cdot \ln(x_{i+1} - x_i))$, as equações do modelo podem ser integradas e a dependência de densidade é permanente e homogênea, tal que a solução do estado pode ser determinada pela equação a seguir. Com isso, o fluxo $q = k \cdot v$ é anulado e, portanto, os resultados são consistentes quantitativamente em relação ao diagrama fundamental (KRAUSS, 1998).

$$v \propto \ln \left(\frac{k_{cong}}{k} \right) \quad (2.15)$$

onde (k_{cong}) é a densidade de congestionamento para qual a velocidade se torna nula.

Edie (1961) também propôs que a sensibilidade fosse função da velocidade instantânea, sendo inversamente proporcional ao espaço, tal que:

$$\frac{\delta v_i(t)}{\partial t} = \alpha' v_i(t) \frac{v_{i+1} - v_i}{(x_{i+1} - x_i)^2} \Big|_{t-\Delta t} \quad (2.16)$$

Na pesquisa de Krauss (1998) o autor conclui que Edie (1961) previu uma descontinuidade no diagrama fundamental, o que levou a ideia de diferenciar dois diferentes *modus-operandi*. Notoriamente, fluxo livre e fluxo congestionado correspondem a dois valores diferentes de sensibilidade α' . Gazis, Herman e Rothery (1961 apud KRAUSS, 1998) unificaram e generalizaram todas as abordagens pela adição da sensibilidade dependente de valores arbitrários de espaço e velocidade:

$$\frac{\partial v_i(t)}{\partial t} = \alpha' v_i(t)^m \frac{v_{i+1} - v_i}{(x_{i+1} - x_i)^l} \Big|_{t-\Delta t} \quad (2.17)$$

onde os parâmetros m e l são livres.

As equações dinâmicas podem ser integradas diretamente da relação velocidade-densidade, que representa a relação de homogeneidade de fluxo. Para $l = 2$ e $m = 0$ o modelo coincide com o modelo de Greenshields (KRAUSS, 1998).

Como visto anteriormente, a velocidade desejada por um veículo é a velocidade do veículo predecessor a ele. Bando et al. (1995) assumiu que a velocidade desejada é função da distância entre veículos.

$$\frac{\partial v_i(t)}{\partial t} = \frac{V_{des}(x_{i+1} - x_i)}{\tau} \Big|_t \quad (2.18)$$

A função $V_{des}(x_{i+1} - x_i)$ tende a zero quando $(x_{i+1} - x_i) \rightarrow 0$ e é delimitada por $(\Delta x \rightarrow \infty)$. Bando et al. (1995) escolheram a velocidade desejada como $V_{des}(\Delta x) = \tanh(\Delta x)$ e τ igual a uma constante. Nessa abordagem a relação velocidade-densidade não pode ser calculada através das equações do modelo, mas devem ser prescritas através da V_{des} .

Krauss (1998) afirma que o modelo de Bando et al. (1995) descreve a formação de aglomerações de veículos. Foi demonstrado que as propriedades da dinâmica do modelo são quase idênticas ao modelo macroscópico Kerner e Konhäuser (1993) e bem próximo ao identificado em observações empíricas.

Ao invés de resolver a equação diferencial para as velocidade dos veículos é possível que se atualize a velocidade em eventos discretos de tempo. Isto é, a velocidade do carro i no tempo do passo t é calculado das condições no tempo, $(t - \Delta t)$ (KRAUSS, 1998).

$$v_i(t) = f(v_i(t - \Delta t), v_{i+1}(t - \Delta t), x_{i+1}(t - \Delta t) - (x_i(t - \Delta t)), \dots) \quad (2.19)$$

Um exemplo de modelo é o de Yukawa e Kikuchi (1995), um modelo determinístico com função (f) escolhida de tal maneira que a dinâmica de cada veículo se torna aleatória.

Outro exemplo é o modelo de Gipps (1981), que começou considerando as distâncias de frenagem dos veículos e questões de velocidade de segurança (sem colisões). Com os motoristas descrentes na capacidade de frenagem do veículo na sua frente, o modelo de Gipps consegue descrever o comportamento dos motoristas e a instabilidade no tráfego.

Entretanto, o principal modelo dessa classe é o modelo de Nagel e Schreckenberg (1992). Nesse modelo a estrada é discretizada em células que correspondem a segmentos de 7,5 metros de comprimento. Uma célula pode estar vazia ou ocupada por um veículo e a sua velocidade é um número inteiro igual ao número de células que um veículo passa por unidade de tempo. O modelo reproduz fielmente a relação velocidade-densidade e aglomerações de veículos.

Os modelos de automação celular foram os primeiros modelos microscópicos usados em grandes redes devido à eficiência computacional, com abordagens baseadas no comportamento humano e simplificações necessárias (KRAUSS, 1998).

Um conceito introduzido por Michaels e Cozan (1963) baseia-se na ideia de que os motoristas reagem se certos limiares são excedidos. Já no modelo de Wiedemann (1974 apud KRAUSS, 1998), diferentes modos de operação são distinguidos para cada equação de modelo dinâmico proposto. A abordagem de Wiedemann foi desenvolvida para uma maior fidelidade ao comportamento do motorista.

Um modelo completamente distinto foi idealizado por Rekersbrink (1994), o qual modelou o sistema motorista-veículo usando controladores fuzzy. Infelizmente, todos são restritos pela alta complexidade computacional para problemas de aplicação para redes de grande porte. O modelo de Rekersbrink (1994), por exemplo, consegue relatórios para apenas 25 veículos simulados em tempo real.

2.4 Simulação de Tráfego

Segundo Portugal (2005), simulação é uma técnica que visa representar um evento real através de um modelo computacional, tratando de forma agregada ou individualizada. A representatividade do sistema pode ser melhorada pela inserção de componentes aleatórios nos agentes envolvidos.

Um modelo de simulação demanda grande esforço de formalização, porém, após sua criação permite uma grande variedade de cenários para refletir distintas situações. Dessa forma, podem ser analisadas de modo premeditado diferentes perspectivas de uma alternativa (POYARES, 2000).

Com o desenvolvimento da informática, os softwares de simulação de tráfego estão cada vez mais robustos, aumentando o detalhamento dos sistemas e fornecendo previsões mais próximas da realidade (SILVA, 2005).

Quando métodos analíticos não representam satisfatoriamente sistemas

complexos, a simulação permite uma comparação entre cenários e recursos para auxiliar a tomada de decisão (RODRIGUES et al., 2004).

Segundo Coelho (2009) o processo de simulação consiste nas seguintes etapas:

- Identificação do problema ou de pontos críticos do sistema;
- Escolha do método e do modelo de simulação conforme etapa anterior;
- Obtenção dos dados e criação do modelo real e dos modelos hipotéticos;
- Desenvolvimento computacional dos cenários de simulação;
- Análise dos dados de saída.

Existem vários softwares de simulação de tráfego, tais como Aimsun, SUMO, Saturn, Vissim, MatSim.

Um modelo é determinístico caso nenhum elemento varie suas características durante a operação, ou seja, suas características são perfeitamente determinadas. Nesse tipo de abordagem, assume-se que os utilizadores da rede percorrem o caminho de menor custo, de menor tempo de viagem ou menor distância (SHEFFI, 1985).

Quando um agente não é determinístico, devido às incertezas sobre o ambiente, o modelo é dito estocástico, que resulta na capacidade dos agentes agirem segundo fatores inesperados, como o caso de percepção de tempo aleatório (RUSSELL; NORVIG, 1995).

2.4.1 Simulação macroscópica

A nível macroscópico, é possível fazer a modelagem de grandes áreas, como regiões metropolitanas, mas a representação dos veículos e dos agentes da rede se torna impossível. Nesse modelo, geralmente, não se inclui a variável tempo, sendo costumeiramente realizadas várias análises para períodos diferentes, como horários de pico, finais de semana ou outros tempos específicos (COELHO, 2009).

Nesse enfoque, o fluxo é considerado um fluido escoando através da rede, mesmo o tráfego tendo característica discreta, compatibilizando-o quando forem necessárias às características inerentes ao tráfego (RUSSELL; NORVIG, 1995).

Segundo Krauss (1998) a abordagem macroscópica não se refere à dinâmica individual dos veículos. De forma geral a densidade $k(x, t)$ e a velocidade média $v(x, t)$ são consideradas, pois ambas são funções de tempo e de espaço. Essas quantidades são encontradas pela média de uma região com abrangência espacial suficientemente grande.

Considerando que em um segmento de estrada a única mudança que ocorre é a entrada e saída no segmento, existe uma equação de conservação de veículos, chamada equação da continuidade para k e v .

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(k \cdot v) = 0 \quad (2.20)$$

As equações do modelo ainda dependem de um outro fator entre densidade e velocidade. Esse modelo foi proposto por Lighthill e Whitham (1955), no qual é assumido que a velocidade é função da densidade, tal que:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + c(k) \frac{\partial k}{\partial x} = 0 \quad (2.21)$$

onde

$$c(k) = \frac{\partial}{\partial k}[k \cdot V(k)] \quad (2.22)$$

Esse modelo descreve as ondas cinemáticas, as características $x(k)$ da posição e a velocidade $c(k)$ da viagem, que é constante. O modelo foi extensivamente utilizado, entretanto Schadschneider et al. (2007) apontam que não é capaz de descrever as propriedades de aglomeração do fluxo de tráfego de maneira correta.

Segundo Krauss (1998), depois dos trabalhos de Greenberg (1959) e Franklin (1965), Payne (1979) formulou a equação que é usada atualmente. A ideia é que a aceleração do veículo é uma função derivada no tempo, descrita pela relaxação através de uma velocidade de equilíbrio local e um termo de antecipação. A antecipação é motivada pelo fato de que cada termo pode ser derivado assumindo que um motorista no ponto x ajusta sua condição em relação ao ponto $(x + 1)/\rho$. Logo, a equação 2.22 fica:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v_i \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{V(k) - v}{\tau} - \frac{c_0^2}{k} \frac{\partial k}{\partial x} \quad (2.23)$$

Enquanto o lado esquerdo da equação é o tempo total derivado da velocidade, o primeiro termo da equação do lado direito se refere à relaxação e o segundo termo à antecipação. As ondas de choque não são bem representadas pelo modelo pois a solução apresenta descontinuidade no espaço (KRAUSS, 1998).

Diferentes abordagens foram feitas para solucionar o problema e a melhor solução proposta foi por Kuhne (2008), que introduziu o termo de viscosidade, que faz com que não ocorram as descontinuidades, tal que equação dinâmica se tornou:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v_i \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{V(k) - v}{\tau} - \frac{c_0^2}{k} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{k} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.24)$$

Kerner e Konhäuser (1993) usaram a estrutura do modelo de Kuhne (2008) e investigaram as não linearidades dinâmicas da formação de aglomerações. Um modelo recente, de Helbring, estende o modelo de Kerner e Konhäuser (1993) para uma equação com variação de velocidade e leva em conta que os veículos ocupam espaços não nulos.

A teoria cinemática de tráfego de veículos evidencia que equações macroscópicas são derivadas de algumas aproximações de iterações de modelos microscópicos de interação entre veículos (KRAUSS, 1998).

2.4.2 Simulação microscópica baseada em agentes

Um Sistema Multi Agente (SMA) é um grupo de entidades autônomas que compreende, decide e opera de acordo com seus interesses, podendo também auxiliar outros agentes a atingirem determinados objetivos (SUN, 2006).

A ideia principal de um SMA é a incorporação de vários agentes para resolução de um problema de alta complexidade. A partir disso, implementam-se processos de interação para atingir os objetivos.

Segundo Bonsall e Palmer (2004) os modelos de simulação em geral possibilitam a coleta de informações sobre comportamentos e situações que seriam difíceis de reproduzir no mundo real. North e Macal (2007) sugerem algumas situações para utilização de SMA :

- Quando o problema pode ser naturalmente representado por agentes;
- Quando as decisões e comportamentos são bem definidos;
- Quando é necessário que os agentes se adaptem e mudem o seu comportamento dinamicamente;
- Quando é preciso que os agentes tenham um componente espacial entre os seus comportamentos e suas iterações.

2.5 Análise de simulações

Segundo Chung (2003), depois de executar uma simulação é necessário realizar uma análise estatística para tomada de decisões em relação ao objetivo do estudo. Existem duas formas de simulação:

- **Sistemas Terminais:** tem uma ocorrência natural no período de interesse da simulação com final, isto é, a simulação é executada por um período de tempo de interesse;
- **Sistemas Não Terminais:** tem uma ocorrência não natural, isto é, é um sistema infinito que busca o estudo do sistema no regime permanente;

Neste trabalho serão realizadas simulações de um sistema terminal e, por esse motivo, são apresentadas algumas definições específicas sobre este tema nas seções subsequentes.

As considerações apresentadas a seguir são baseadas no trabalho de Chung (2003) a respeito de análise de simulações em sistemas terminais.

2.5.1 Sistema terminal

Para ser feita a análise do processo para sistemas terminais precisam ser executados os seguintes procedimentos (CHUNG, 2003).

- Análise do número de replicações;

- Execução das simulações;
- Análise estatística dos resultados das simulações;
- Análise geral dos resultados.

2.5.1.1 Análise do número de Replicações

A variabilidade da entrada dos dados resulta em algumas variações de medidas de desempenho do sistema. Assim, para reduzir o erro numa tomada de decisão é sugerido que se realize várias replicações das simulações.(CHUNG, 2003).

Segundo Chung (2003) inicialmente se escolhe um número arbitrário de simulações, com iterações do cálculo do número de replicações e execução de simulações até que sejam atingidos valores de tolerância definidos pelo analista.

De acordo com o autor, para calcular o número de replicações é necessário que se calcule a média e o desvio padrão de no mínimo dez replicações, tal que o erro padrão (SE_{Error}) é calculado por:

$$SE_{Error} = \frac{t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (2.25)$$

onde t = distribuição t para $1 - \alpha/2$ e $n - 1$ graus de liberdade;

s = desvio padrão;

n = número de replicações.

O erro padrão é basicamente a dispersão em torno da média, tal que o valor de (t) depende basicamente de dois parâmetros, o valor de (α) para o nível de confiança desejado e o número de graus de liberdade (n).

O desvio padrão (s), é calculado dependendo apenas dos valores encontrados e dos valores médios da medida de desempenho avaliada das replicações.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n \bar{x}_i - \bar{\bar{x}}}{n - 1}} \quad (2.26)$$

onde s = desvio padrão;

\bar{x}_i = média da medida de desempenho na n -ésima replicação;

$\bar{\bar{x}}$ = média das médias nas replicações;

n = número de replicações em uma dada iteração;

i = número de replicações para alcançar a precisão desejada.

Chung (2003) afirma que para se estabelecer o número de replicações necessárias para se obter valores de uma medida de desempenho x sob diferentes níveis de significância e precisão, em geral, se usam dois métodos:

1. Comparação absoluta do erro padrão para uma nível de tolerância;

2. Comparação relativa do erro padrão em comparação com a média.

$$Prec.Absoluta = \frac{t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (2.27)$$

Rearranjando os termos é encontrado o número de replicações (i) para alcançar o nível desejado de precisão que é arbitrário:

$$i = \left[\frac{t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot s / \sqrt{n}}{Prec.Absoluta} \right]^{1/2} \quad (2.28)$$

O número resultante deve ser arredondado para cima para atender ao nível de confiança desejado. O processo iterativo deve verificar se são necessárias mais replicações para o modelo.

O método de precisão relativa é melhor em relação ao anterior, por não precisar arbitrar um nível de precisão absoluto. Esse método divide a taxa pelo erro padrão e obtém uma análise estatística mais precisa, desde que se use um erro padrão pequeno em relação a média. Geralmente se usa o valor de 0,10, o que significa que o erro padrão deve ser de até 10% do valor da média (CHUNG, 2003).

$$Prec.Relativa = \frac{t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot s / \sqrt{n}}{\bar{x}} \quad (2.29)$$

De forma semelhante, reorganizando os termos, pode-se encontrar o número de replicações (i) referente a Precisão Relativa.

$$i = \left[\frac{t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot s}{Prec.Relativa \cdot \bar{x}} \right]^{1/2} \quad (2.30)$$

É comum em um projeto, que o analista tenha que comparar dois modelos diferentes. Geralmente um é o modelo base e o outro é o modelo com alguma mudança.

Para a análise de modelos aos pares é recomendado que o analista utilize a abordagem de testes de hipótese e/ou de intervalo de confiança. O teste de hipótese se resume em aceitar ou não uma hipótese, geralmente de que os modelos são iguais. O teste de confiança avalia a diferença entre os modelos para uma medida de desempenho em função de uma dada confiança.

O teste de confiança possui algumas vantagens em relação ao teste de hipótese:

- Fornece mais informações que o teste de hipótese;
- Mostra o resultado graficamente;
- É mais fácil de usar e explicar do que o teste de hipótese.

O método de intervalo de confiança de Welch é o mais comum pois não demanda de esforço para manipular os parâmetros através do modelo. Além disso, não é necessário se preocupar com a variância entre os dois modelos, pois o teste considera o pior cenário entre dois conjuntos de dados (CHUNG, 2003).

Para cada cenário considerado é necessário calcular a média e o desvio padrão para cada conjunto, além dos graus de liberdade pelo método de Smith-Satterthwaite dados por:

$$g \cdot l = \frac{[s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2]}{[s_1^2/n_1]^2/(n_1 - 1) + [s_2^2/n_2]^2/(n_2 - 1)} \quad (2.31)$$

onde $g \cdot l$ = grau de liberdade;

s_1^2 = variância simples da primeira alternativa;

s_2^2 = variância simples da segunda alternativa;

n_1 = tamanho da amostra da primeira alternativa;

n_2 = tamanho da amostra da segunda alternativa;

A recomendação de Chung (2003) é que o valor do grau de liberdade seja arredondado para o valor inteiro mais próximo abaixo do calculado pois o valor da estatística (t) calculado no teste culmina com a diminuição daquele valor.

Desse modo, o intervalo de confiança pela abordagem de Welch pode ser calculado por:

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 \pm t_{d.f., 1-\alpha/2} \cdot \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \quad (2.32)$$

onde \bar{x}_1 = média da medida de desempenho das replicações da primeira alternativa;

\bar{x}_2 = média da medida de desempenho das replicações da segunda alternativa;

t = estatística t com $g \cdot l$ graus de liberdade e nível de confiança $1 - \alpha/2$.

A equação também pode ser vista em sua forma mais tradicional, mostrando o valor do intervalo de confiança em relação a valores mínimo(*min*) e máximo(*max*).

$$[min - valor, max + valor] \quad (2.33)$$

Quanto mais próximo de zero o intervalo de confiança, menor é a diferença entre os modelos.

O método de intervalo de confiança do teste t pareado é usado quando dois modelos diferentes devem ser combinados. Nesse método deve-se calcular uma nova variável baseada na diferença das médias das replicações entre duas alternativas.

$$Z_i = \bar{X}_{1i} - \bar{X}_{2i} \quad (2.34)$$

onde \bar{X}_{1i} = é a média da i -ésima replicação da primeira alternativa;

\bar{X}_{2i} = é a média da i -ésima replicação da segunda alternativa;

Z_i = é a diferença da média para a i -ésima replicação;

Para cada replicação há uma estatística Z_i correspondente, tal que é necessário estimar a média (\bar{Z}) e o desvio padrão (s_z) dessa nova variável. A fórmula a seguir resulta no valor do intervalo de confiança para Z .

$$\bar{Z} - t_{\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq Z \leq \bar{Z} + t_{\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.35)$$

onde \bar{Z} = média das replicações da variável Z ;

$t_{\alpha/2, n-1}$ = valor da distribuição t para $\alpha/2$ e $n - 1$ graus de liberdade;

n = número de replicações;

s_z = desvio padrão de Z ;

Para fazer comparações entre 3 ou mais modelos eventualmente é necessário executar dois passos. O primeiro passo é a análise de variância (ANOVA), usada para determinar se a significância estatística da diferença entre uma ou mais médias dos diferentes modelos. Se não houver uma diferença estatisticamente significativa a análise pode ser finalizada.

A análise de variância pode ser usada para determinar se a média de uma ou mais alternativas possui significância estatística diferente das outras alternativas pelo nível de (α). Uma alternativa pode ser melhor ou pior que as demais alternativas, e a ANOVA é baseada numa taxa de variância entre as diversas alternativas. Se a variação entre as alternativas é grande e a variância das diferentes alternativas é pequena, a taxa possui um valor grande comparado. Logo, se a variação é pequena, a variância é grande a taxa será pequena (CHUNG, 2003).

Existem diferentes formas de se executar uma ANOVA, entretanto a maneira mais simples é examinando somente fatores individuais (CHUNG, 2003). Para isso, é necessário calcular um conjunto de estatísticas para cada replicação individual entre alternativas diferentes.

- Soma dos Quadrados Total (SST);
- Soma dos Quadrados entre as alternativas (SSB);
- Soma dos Quadrados dentro de cada uma das alternativas (SSW);
- Média entre as alternativas;
- Média dentro de cada uma das alternativas;
- Estatística F .

O valor de F é comparado com o F_{crit} e se o $F < F_{crit}$ então é possível concluir que os modelos são iguais do ponto de vista estatístico.

A Soma dos Quadrados Total (SST) é a diferença entre a média de cada replicação de cada alternativa.

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (2.36)$$

onde SST = soma dos quadrados total;

k = quantidade de alternativas;

n = número de replicações para cada alternativa;

x_{ik} = uma única média de replicação de uma alternativa;

\bar{x} = a grande média de todas as replicações.

Chung (2003) estabelece que a Soma dos Quadrados Entre as Alternativas (SSB) é calculado somando a diferença das médias individuais de cada replicação:

$$SSB = \sum_{i=1}^k n \cdot (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.37)$$

onde SSB = Soma dos Quadrados Entre Alternativas;

\bar{x}_i = é a média da replicação de uma única alternativa;

$$SST = SSB + SSW \quad (2.38)$$

A soma quadrática total (SST) é igual a soma de (SSB) e (SSW), e, portanto, a soma quadrática entre alternativas é:

$$SSW = SST - SSB \quad (2.39)$$

A média quadrática entre as alternativas (MSB) é estimada através do modelo a seguir:

$$MSB = \frac{SSB}{k - 1} \quad (2.40)$$

onde MSB = Média Quadrática entre Alternativas;

SSB = Somatório dos Quadrados entre Alternativas;

k = é o número de alternativas;

Analogamente, é necessário calcular a média quadrática dentro de cada alternativa (MSW), dada por:

$$MSW = \frac{SSW}{k \cdot (n - 1)} \quad (2.41)$$

onde MSW = Média Quadrática Dentro de cada Alternativa;

SSW = Somatório Quadrático Dentro de cada Alternativa;

n = número de replicações para cada alternativa.

Finalmente, é possível calcular a estatística F dada pela relação da média quadrática entre as médias entre alternativas (MSB) e dentro de cada alternativa (MSW).

$$F = \frac{MSB}{MSW} \quad (2.42)$$

Por último, ainda é necessário conforme mencionado anteriormente uma comparação entre o F estatístico e um valor de (F_{crit}). O valor de F_{crit} é tabelado pela distribuição F de Fischer, e os parâmetros para encontrá-lo na tabela são: nível de significância (α), número de graus de liberdade do numerador ($gl_{numerador}$), bem como o número de graus de liberdade do denominador ($gl_{denominador}$). O número de graus de liberdade é o mesmo que foi encontrado dividindo para SSB (número de alternativas menos 1), bem como o número de graus de liberdade do denominador encontrado para SSW (número de replicações menos 1).

$$gl_{numerador} = k - 1 \quad (2.43)$$

$$gl_{denominador} = k \cdot (n - 1) \quad (2.44)$$

onde k = é o número de alternativas;

n = é o número de replicações;

O F calculado é finalmente comparado com o F_{crit} . Se o F for maior que o valor crítico então pelo menos uma alternativa é diferente das demais, caso contrário, todas as alternativas são estatisticamente iguais.

A análise de Duncan, caso as alternativas sejam diferentes estatisticamente indica qual média é estatisticamente diferente das demais para um nível de significância (CHUNG, 2003).

Neste trabalho o intuito é verificar apenas se os cenários são iguais ou diferentes. Se alguns dos cenários avaliados forem semelhantes, isso demonstra que não ocorreria melhora ou piora com as mudanças efetuadas para a requalificação urbana no ponto de vista de tráfego urbano, caso contrário, será mostrado apenas se houve melhora ou piora entre os cenários quando comparados com a situação atual.

2.5.1.2 Análise Estatística dos Resultados

Com os resultados da simulação e as análises de ANOVA e de Duncan é possível verificar as diferenças entre cenários, estabelecendo os critérios como custo, aumento da eficiência, ou, no caso desse trabalho, o aumento da capacidade de tráfego na região estudada pela abertura das faixas do BRT para a circulação de automóveis.

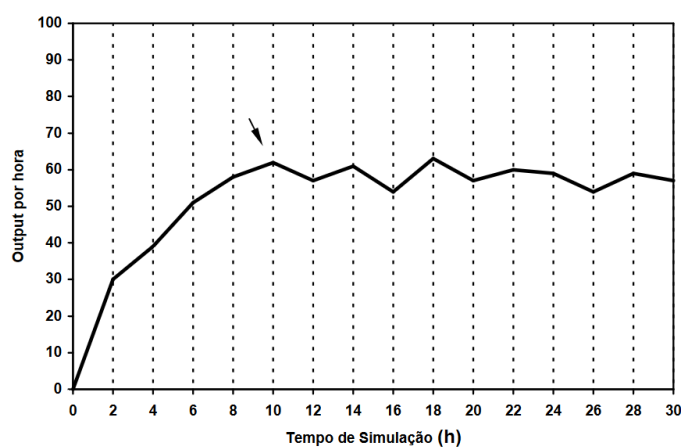
2.5.2 Warm-up period

Em uma simulação é importante que o comportamento não apresente variações significativas ao longo do tempo para viabilizar o cálculo de valores médios realistas. Uma vez que o sistema comece "vazio", é necessário um tempo para que atinga um

estado de estabilidade. A partir desse ponto ocorrem variações porém, as distribuições das variáveis são semelhantes em períodos de tempos sucessivos (BAIRD; LEAVY, 1994).

A palavra "*warm-up*" em português significa aquecimento e em simulação Baird e Leavy (1994) corresponde ao tempo necessário para se atingir o estado de equilíbrio como função do tempo de atividade e da quantidade total de atividades. Dependendo do modelo, o período de aquecimento pode levar centenas de horas, sendo necessário que se espere entre o fim desse período e o final da simulação para calcular as estatísticas do sistema. Dessa forma são eliminadas as tendências do estado transiente.

Figura 7 – Gráfico para definição de *warm-up period*



Fonte: Harrell, Ghosh e Bowden (2011).

Note que na Figura 7 a medida de desempenho (output por hora) se estabiliza aproximadamente em 10 horas, ou seja, a partir desse momento os dados devem ser armazenados pois o sistema já está em regime permanente.

2.6 Simulador de tráfego SUMO

O SUMO (Simulation of Urban Mobility) é um software de simulação de tráfego que utiliza equações de modelagem microscópica de tráfego. É uma ferramenta open-source que permite modelar o tráfego de automóveis, pedestres e transporte público (KRAJZEWICZ et al., 2002).

Além disso, o software suporta formatos de outros softwares para carregar a rede de tráfego (por exemplo, Visum e Vissim) e permite abrir uma rede de tráfego disponibilizada por um sistema de georreferenciamento, o *Open Street Maps* (KRAJZEWICZ et al., 2002);

2.6.1 Modelo de Krauss

O modelo desenvolvido por Krauss, segundo Song et al. (2014), é microscópico, espaço-contínuo, segue um modelo de seguimento-veicular. O SUMO utiliza esse modelo tal que, a velocidade de segurança (v_{seg}) é:

$$v_{seg} = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)t_r}{\frac{v_l + v_f(t)}{2 \cdot b} + t_r} \quad (2.45)$$

onde $v_l(t)$ = representa a velocidade do veículo líder no tempo t ;

$g(t)$ = intervalo do veículo líder no tempo t ;

t_r = tempo de reação do motorista(aproximadamente 1s);

b = desaceleração máxima do veículo(m/s^2).

Segundo Song et al. (2014), além da velocidade de segurança, o veículo pode desenvolver uma velocidade máxima limitada pelas condições da via e/ou dos veículos (v_{max}) e a velocidade estabelecida pelo motorista (dada pela sua aceleração), isto é, entre as três velocidades o modelo aceita a de menor valor para o veículo para ser sua velocidade desejada (v_{des}), que é dada por:

$$v_{des} = \min [v_{max}, v + a \cdot t, v_{seg}] \quad (2.46)$$

onde v_f = velocidade do veículo seguidor;

v_{des} = velocidade desejada;

a = aceleração;

t = tempo de duração dos passos da simulação;

v_{seg} = velocidade de segurança;

v = velocidade inicial;

η = é um número aleatório.

No modelo também existe a velocidade do veículo seguidor (v_{t+T}^f) no tempo (t) (SONG et al., 2014):

$$v_{t+T}^f = \max [0, v_{des} - \epsilon a \cdot \eta] \quad (2.47)$$

2.6.2 Rede de Tráfego

A rede de tráfego é um grafo que representa arcos e nós. Os nós são as interseções, ou cruzamentos, existentes numa malha viária, enquanto os arcos são os elos entre esses nós, no caso de tráfego urbano, as estradas.

No SUMO, uma rede de tráfego (*network*) é gerada a partir de 2 arquivos, o arquivo de arcos(*edges*) e o arquivo de nós(*nodes*) (KRAJZEWICZ et al., 2002).

O arquivo de nós no SUMO representa os cruzamentos de uma malha viária, representada no arquivo *nodes* (*nod.xml*). Os arquivos de arcos são representados pelas ruas e pelas direções existentes no arquivo *edges* (*edge.xml*).

O arquivo de redes (*net.xml*) é criado a partir dos arcos e nós via *prompt* de comando. Também é possível importar uma rede através de um arquivo do *open street maps*, convertendo em um arquivo xml.

Há diversas formas de serem definidas rotas pelo SUMO. Além de ser possível criar rotas manualmente para cada veículo, como o conjunto de arcos percorridos, é possível utilizar ferramentas que geram rotas de diversas formas (KRAJZEWICZ et al., 2002).

- **DUAROUTER**: define-se o arco de origem e de destino, e o software gera uma rota de menor caminho entre esses dois segmentos.
- **JTRROUTER**: define rotas aleatoriamente, não necessariamente pelo caminho mais curto, também dependendo da probabilidade de um veículo ir de um arco adjacente a outro.
- **OD2TRIPS**: gera o arquivo de rotas através de uma matriz OD, e requer um arco ou zona (conjunto de arcos, por exemplo bairros) de origem e outro de destino.

Para executar uma simulação é necessário unir o arquivo de redes e o arquivo de rotas, através do arquivo de configuração (*sumo.cfg*), que também permite estabelecer relatórios de saídas e outras entradas como imagens.

Neste trabalho foi usado o OD2TRIPS para gerar as rotas, pois é uma forma de aplicar o modelo de equilíbrio do usuário, já que a cada passo de simulação ele calcula o menor caminho para cada veículo considerando o carregamento nos arcos. A alocação de tráfego é uma etapa do Modelo 4 Etapas.

2.7 Modelo 4 Etapas

Segundo Campos (2013) o procedimento clássico para o planejamento de transportes é inicialmente a coleta de dados. Com os dados, faz-se identificação de demanda futura, utilizando-se o modelo sequencial de demanda, mais conhecido por "Modelo 4 Etapas".

O Modelo 4 Etapas compreende "Geração de Viagens", "Distribuição de Viagens", "Divisão Modal" e "Alocação de Tráfego".

Segundo Ortúzar e Willumsen (2011) a geração de viagens é uma etapa do modelo clássico de transportes para determinar o número total de viagens originadas nos centroides das zonas da área de estudo e o número total de viagens com destinos para essas localidades, podendo ser determinado através de dados sócio-econômicos, população, número de carros, distância, entre outros.

A produção e a atração fornece uma ideia de viagem nas áreas estudadas mas não são suficientes para modelagem e tomada de decisão. É necessário então definir o padrão de viagens realizadas entre localidades. Nesse sentido, o objetivo dos modelos de distribuição de viagens é estimar o número de viagens futuras entre pares

origem-destino (OD) a partir de dados de um ano base (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

A matriz de viagens é uma forma de representação de viagens, que relaciona uma origem O_i com um destino D_i e a quantidade de deslocamentos entre eles, denominado-se essa tabela como matriz OD. Esta representação é necessária para todos os modelos de alocação de tráfego (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

Hazelton (2001) mostrou que estimação de matrizes OD é diferente de reconstrução. Reconstruir é obter viagens entre o par OD (ij) que recupera a rota original e as contagens de tráfego, um processo que demanda, além das contagens de tráfego, informações em relação as rotas. A estimação leva em consideração as observações de tráfego em cada arco e sua utilização nas viagens.

Bertoncini (2010) afirma que dificilmente o fluxo original em uma rede por ser recuperado apenas com contagens de tráfego nos arcos, devido ao problema ser um processo indeterminado: o número de incógnitas, viagens (ij) e rotas, é menor do que o número de informações, havendo múltiplas soluções.

Segundo Willumsen (1981), o modelo gravitacional visa estimar a matriz OD em função do total de viagens produzidas em cada zona de tráfego, do total de viagens que a zona de tráfego atraiu e dos custos das viagens. Costumeiramente, os métodos gravitacionais necessitam de outras pesquisas, como entrevistas domiciliares, além das contagens. Também é generalizado da seguinte forma:

$$Q_{ij} = b_i \cdot O_i \cdot D_j \cdot c_{ij}^{-d} \quad (2.48)$$

onde Q_{ij} = quantidade de viagens entre origem (i) e destino (j) ;

b_1 e d = parâmetros a serem calibrados;

O_i = total de viagens originais na zona (i) ;

D_j = total de viagens com destino (j) ;

c_{ij} = custo de viagem entre i e j .

Os modelos gravitacionais têm grande vantagem pela consideração de parâmetros populacionais. Porém a desvantagem do modelo é a necessidade de grande quantidade de dados para calibração (BERTONCINI, 2010).

Por outro lado, o Método do Fator de Crescimento Uniforme e de Crescimento Uniforme Restrito nas Origens ou nos Destinos são métodos de estimação de viagens futuras por zona de tráfego em função de variáveis que influenciam na geração das mesmas (CAMPOS, 2013).

Entre eles, o Método de Fratar é um procedimento iterativo de correção do conteúdo da matriz OD em relação ao número total de viagens atraídas e produzidas pelas zonas. Segundo Campos (2013), os métodos de fator de crescimento possuem uma forma geral:

$$t'_{ij} = f_{ij} \cdot t_{ij} \quad (2.49)$$

onde t'_{ij} = número de viagens futuras entre as zonas i e j ;
 f_{ij} = fator de expansão;
 t_{ij} = número de viagens atuais entre as zonas i e j .

No método de Fratar considera-se que o número de viagens que saem de uma zona (i) para uma zona (j) é proporcional ao número de viagens totais que saem de uma zona (i) modificado pelo fator de crescimento de (j) (CAMPOS, 2013).

O método possui 3 etapas, que serão descritas a seguir (CAMPOS, 2013):

1º Passo: Calcular o fator de crescimento da zona de tráfego.

$$f_i = \frac{P_i^*}{P_i} \quad (2.50)$$

onde P_i^* = estimativa do total de viagens produzidas na zona i ;

P_i = viagens atuais na primeira iteração e viagens estimadas a partir da segunda iteração;

2º Passo: Calcular as viagens entre zonas de tráfego utilizando a fórmula a seguir:

$$t_{ij} = \frac{P_i^* \times t_{ij} \times f_j}{\sum_j t_{ij} \times f_j} \quad (2.51)$$

3º Passo: Montar a nova matriz estabelecendo:

- $t_{ij} = \frac{1}{2} \cdot (t'_{ij} + t'_{ji})$, onde t' é o valor calculado na iteração anterior;
- a soma dos valores de P_i e voltando ao passo 1;

O modelo é encerrado quando o fator (f_i) estiver inserido num intervalo determinado, que foi previamente estabelecido de acordo com a precisão desejada.

É importante ressaltar que os métodos de fator de crescimento exigem a existência de uma matriz OD prévia, comumente denominada, "matriz semente", para que as viagens contidas nela sejam expandidas para o total de produzidas e/ou atraídas por zona de tráfego.

Neste trabalho, como será explicado no próximo capítulo, a matriz semente utilizada é a da matriz das distâncias euclidianas de todas as zonas de tráfego. Isso forneceu o suporte para aplicar o Modelo de Fratar e se conseguir uma matriz OD, já que é inexistente para o município de Curitiba.

A escolha do modo de transporte é vital para planejamento de transportes e elaboração de políticas públicas. Afeta a eficiência, o espaço urbano destinado a cada modo e as escolhas dos usuários (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

Nesse sentido, a terceira etapa de divisão modal tem o objetivo de determinar a quantidade de viagens que ocorrem em cada modo de transporte entre as zonas de tráfego, resultando em uma nova matriz OD para cada modo de transporte existente. A divisão modal é feita com base em dados sócio-econômicos, e características de cada modo de transporte (CAMPOS, 2013).

Finalmente, na quarta etapa, a alocação de veículos consiste em identificar o número de viagens em cada um dos arcos da rede tráfego mediante uma função de desempenho que, geralmente, representa o tempo de viagem nessas seções. É útil considerar o sistema de transporte público com o contexto de menor custo, não necessariamente monetário, mas relacionados ao tempo de viagem, conforto, capacidade, velocidade, frequências de viagens, entre outros itens relacionados (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

O modelo de equilíbrio do usuário considera que: para cada par OD, o tempo de viagem de todas as rotas utilizadas é igual ou menor ao tempo de viagem em uma rota não utilizada, caracterizado como Equilíbrio de Wardrop (SHEFFI, 1985).

A aplicação deste modelo envolve dois importantes problemas de alocação de fluxos em rede (CAMPOS, 2013):

- determinação da rota de menor custo (tempo) da rede;
- minimização do custo total da rede.

Uma alocação de tráfego dinâmica é uma alocação que considera a alteração de rota do veículo enquanto executa o percurso entre o par OD. Por exemplo, em microsimulação os modelos microscópicos se baseiam em veículos alocados em rotas. Uma alteração de uma dessas rotas no meio do caminho é uma forma dinâmica, geralmente baseadas no equilíbrio do usuário, para encontrar uma rota de menor tempo (CHIU et al., 2011).

Geralmente na microssimulação as rotas são geradas apenas pelo caminho mínimo, quando não são dinâmicas, isto é, não considera o congestionamento para escolher suas rotas. Já na alocação de tráfego dinâmica existem métodos iterativos levando em conta as mudanças do nível de performance da rede de tráfego.

Nos modelos dinâmicos existe uma relação entre tempo de viagem e congestionamento: se a saída de veículos em um arco está menor que a entrada, a densidade da via aumenta (causando congestionamentos) e a velocidade vai diminuindo, chegando ao diagrama fundamental *velocidade-densidade*, o que consequentemente causa um aumento no tempo de viagem (CHIU et al., 2011).

2.8 Sistemas BRT

A implantação de um sistema de transporte público de grande capacidade e de qualidade atrativa é uma necessidade para os centros urbanos atuais. O BRT é uma alternativa cada vez mais usada, pois é um sistema de qualidade, possui flexibilidade e um baixo custo de implantação (KOEHLER; CAMPONOGARA; JUNIOR, 2011).

O BRT é um sistema de transporte de ônibus de alta capacidade que realiza de forma rápida sua operação e de forma eficiente, com prioridade de passagem na rede de tráfego. Consiste de um sistema com vias segregadas, estações modernas,

ampla capacidade para demanda de passageiros, embarques e desembarques em nível, e geralmente com ônibus modernos que emitem menos poluentes. Suas poucas paradas aumentam a velocidade operacional, contribuindo para a mobilidade urbana e o desenvolvimento da região (WRIGHT; HOOK, 2007).

As cidades buscam no BRT uma solução eficiente, pois seu custo de implantação é relativamente baixo e sua capacidade de transporte de pessoas é grande. Existem diversos níveis de sistemas de transporte público por ônibus, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Características de um BRT Completo

Serviços de transportes alternativos	Serviços de ônibus convencional	Corredores Básicos	BRT-leve	BRT	BRT Completo
<ul style="list-style-type: none"> > Operadores sem regulamentação > Similares a taxis (lotações) > Serviço ruim > Pouca segurança no trânsito/ segurança pessoal > Veículos velhos e pequenos 	<ul style="list-style-type: none"> > Operação privada ou pública > Normalmente subsidiados > Cobrança dentro do ônibus > Paradas sinalizadas com postes ou coberturas bem simples > Serviço ruim > Ônibus tamanho padrão 	<ul style="list-style-type: none"> > Vias segregadas em corredores isolados > Cobrança dentro do ônibus > Paradas com coberturas simples > Ônibus tamanho padrão 	<ul style="list-style-type: none"> > Algumas forma de prioridade, mas não vias totalmente segregadas > Melhores tempos de viagem > Paradas de melhor qualidade > Tecnologia veicular (de emissões) limpa > Identidade de mercado 	<ul style="list-style-type: none"> > Vias segregadas > Tipicamente cobrança externa > Estações de melhor qualidade > Tecnologia veicular (de emissões) limpa > Identidade de mercado 	<ul style="list-style-type: none"> > Serviço de metrô > Rede de linhas e corredores integrados > Estações fevhadas de alta-qualidade > Cobrança externa > Serviço rápido e frequente > Veículos modernos, tecnologia (emissões) limpas > Identidade de mercado > Superior customer service

Fonte: Wright e Hook (2007).

Segundo Wright e Hook (2007) o sistema com maior capacidade atualmente é o sistema *Transmilênio* de Bogotá, que consegue atender 42.000 pessoas por hora por sentido. Em geral, as velocidades operacionais oscilam entre 23 a 39 km/h. Para atingir uma grande velocidade operacional e uma grande capacidade de transporte, os sistemas de BRT têm algumas características comuns:

- Múltiplas posições de paradas nas estações;
- Serviços expressos de poucas paradas;
- Veículos articulados com múltiplas e largas portas;
- Pagamento e controle de pagamento fora do ônibus;
- Plataformas de embarque em nível e bons espaços nas estações;
- Controle de interseções através de coordenação semafórica;

Para aumentar a atratividade do sistema é indicado que este tenha (WRIGHT; HOOK, 2007):

- Sinalização clara e mapas para facilitar o uso e o entendimento do sistema;
- Funcionários capacitados e amigáveis;
- Iluminação de alta qualidade para prover maior segurança;
- Limpeza e aparência estética da infraestrutura.

A capacidade unitária de um ônibus de um sistema BRT pode chegar a 160 pessoas. Devido a sua capacidade, maior velocidade operacional e as vias segregadas, o sistema mais se assemelha a um transporte ferroviário do que um de ônibus convencional (WRIGHT; HOOK, 2007).

Abaixo uma ilustração do sistema de BRT na cidade de Curitiba, um sistema BRT Completo que consegue transportar diariamente 543 mil pessoas nos 6 eixos de linhas de BRT do município (TRISOTTO, 2014).

Figura 9 – Corredor de BRT Completo - Linha Verde de Curitiba



Fonte: Wikipedia (2013).

É necessário avaliar os sistemas viário e de BRT da cidade com indicadores de desempenho para se poder realizar uma análise, podendo ser indicadores quantitativos ou qualitativos. Neste trabalho foi optado por indicadores quantitativos.

2.9 Indicadores de Desempenho de Tráfego

Cada cidade possui suas características e individualidades, e todas compartilham os problemas de operação e controle de tráfego. Apesar de se poder aplicar tecnologias e políticas públicas semelhantes, cada local tem autonomia para definir suas estratégias. São elaboradas 4 estratégias: eficiência de tráfego, segurança de tráfego, redução da poluição, integração social e uso do solo. A partir disso são elaborados Indicadores Chaves de Desempenho (KPI's) para servir como base para

aplicação nas cidades (KAPARIAS; BELL; TOMASSINI, 2011).

O planejamento de transporte deve ter o menor número de indicadores possível para facilitar a aquisição e análise de dados (KAPARIAS; BELL; TOMASSINI, 2011).

A simulação do SUMO fornece dados distintos de saída: emissão de poluentes, velocidade, comprimento da rota, tempo de viagem, consumo de combustível ou de energia elétrica. Foi definido que, para cumprir o objetivo deste trabalho, os KPI's escolhidos foram tempo médio de viagem, tempo de espera em congestionamentos e velocidade média dos veículos na rede.

A partir dos indicadores de desempenho é possível analisar diferentes hipóteses para a avaliação de uma nova função ao corredor BRT, podendo a partir daí avaliar uma requalificação urbana do local.

2.10 Requalificação urbana

A requalificação urbana tem sido objeto de muitos estudos, devido principalmente ao declínio industrial nos centros urbanos. A revitalização pode ser definida como conjunto de medidas que visam criar nova vitalidade e dar novo grau de eficiência a uma infraestrutura urbana (JARDIM, 2012).

Com o crescente consumo do espaço e dos recursos disponíveis, tem-se visto um aumento da degradação do território, levando a adoção de processos que vão contrários a esta tendência. A requalificação urbana é vista como instrumento de intervenção e deve ser imposta com intuito de melhorar a qualidade de vida nas cidades (SILVA, 2007).

Esses projetos de revitalização buscam a renovação urbana, atuando em defesa do renascimento econômico, social e cultural. Assim, um processo de revitalização urbana pode incluir ações de conservação e de demolição, uma vez que as intervenções podem se restringir a aspectos específicos (JARDIM, 2012).

Um exemplo de requalificação urbana é a *High Line*, em Nova York. Era uma linha férrea elevada, que foi utilizada para transporte de cargas destinadas a servir um distrito industrial. O objetivo ao ser elevada foi segregar o transporte férreo dos automóveis sendo desativada em 1980 e deixando o local sem uso (JARDIM, 2012).

Com o passar dos anos, a população local sugeriu a formação de um parque linear em substituição à linha férrea. O *High Line Park* foi aberto anos mais tarde, como forma de lazer para a população, tendo grande aceitação por parte da população. Identificando uma nova função para o local abandonado (JARDIM, 2012).

No Brasil, tem-se procurado alternativas de uso para o elevado Costa e Silva, o *Minhocão*, na cidade de São Paulo. Como o elevado trouxe poluição sonora, visual, ambiental, degradação dos imóveis locais, do comércio e desvalorização do entorno, uma solução para essa mudança é buscada. Algumas propostas foram elaboradas,

desde a demolição, até a reurbanização do local como medida mitigadora dos efeitos nocivos ao ambiente urbano (SILVA, 2007).

Em Curitiba, quando foi construído o corredor de BRT na linha Santa Cândida/Capão Raso, a via era utilizada por veículos individuais. A exclusividade para transporte público já foi uma forma de reutilizar um sistema para melhorar o entorno e o transporte das pessoas (SILVA; SANT'ANNA, 2006).

3 MÉTODO

Este capítulo aborda a metodologia utilizada no trabalho, desde a aquisição e tratamento de dados, criação da matriz OD, os arquivos de entrada no SUMO e a análise de simulação. O tipo de pesquisa realizado foi um estudo de caso no corredor de BRT, eixo Norte-Sul, de Curitiba.

3.1 Aquisição de Dados

A cidade de Curitiba se destaca por possuir muitos dados disponíveis nos sites de seus órgãos públicos, além de possuir projetos para a mobilidade da cidade. Ainda mais, Curitiba é uma cidade precursora no planejamento urbano brasileiro, motivando ainda mais para o estudo ser no local. A escolha como uma das cidades sede da Copa do Mundo de 2014 favoreceu novos estudos e pesquisas para implantação de projetos de mobilidade urbana na cidade, fazendo com que os dados sejam suficientemente recentes para análises da representação do sistema atual.

No site do IPPUC (2016b), são disponibilizados dados de contagem e locais de contagem separados por anos. O ano de 2012 é o que possui mais pontos de contagens de tráfego, com 451 locais nas principais vias do município. Esses dados foram os escolhidos por estarem mais completos em relação aos outros anos, mesmo não sendo os mais recentes.

Os dados de contagem de 300 planilhas continham as informações sobre o número de automóveis, ônibus, caminhões, motos e bicicletas. Entretanto os dados de outras 151 planilhas tinham apenas os modos: automóveis, caminhões e ônibus. Assim, foram descartados os dados de contagem de motos e bicicletas para este estudo.

As planilhas estavam seguindo o seguinte padrão de contagem classificatória a cada 15 minutos nos horários de maior fluxo (início da manhã e final da tarde). Com isso foi estabelecido a média hora no horário de pico para cada ponto de contagem, gerando o pontapé inicial. Os fluxos nas interseções considerados neste estudo foram referentes aos maiores valores observados nos picos da manhã ou da tarde para cada ponto de contagem.

O IPPUC também disponibiliza os pontos de contagem georreferenciados, em que 297 pontos se concentravam em apenas 4 bairros, enquanto os outros 154 pontos se dividiam em mais de 20 outros bairros, entretanto sem ficar próximo ao corredor de BRT - Santa Cândida/Capão Raso. Os dados dos 4 bairros (Centro, Batel, Água Verde

e Rebouças) foram utilizados neste estudo, descontando-se os outros 154 observados.

A Figura 10 a seguir mostra a linha de BRT destacada em amarelo, os pontos de contagem em vermelho e a rede de tráfego de Curitiba em cor preta.

Figura 10 – Pontos de contagem na cidade de Curitiba e o corredor de BRT, eixo Norte-Sul, em destaque



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 11 mostra os pontos de contagem agrupados nos bairros, incluindo o traçado do sistema de BRT na região.

Figura 11 – Pontos de contagem dos 4 bairros e o corredor de BRT



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Matriz Origem-Destino

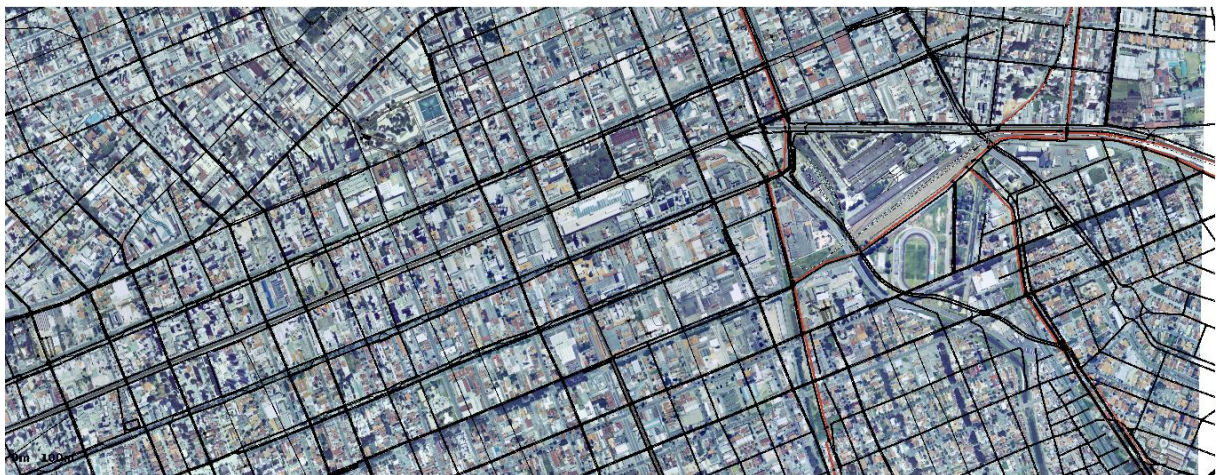
Um dos dados fundamentais para planejamento urbano, é a matriz origem-destino. Como em Curitiba, segundo o IPPUC, até o ano de 2016 não havia nenhuma pesquisa origem-destino realizada (a primeira está em curso), foi necessário estimar uma matriz desse tipo para este trabalho.

Os pontos de contagens apresentam fluxos de entrada e saída de veículos nos nós da rede. Esses fluxos foram admitidos como o número total de viagens atraídas e produzidas por centroides. Para estimar a matriz OD de viagens entre nós foi utilizado o Método de Fratar caracterizado no capítulo anterior. Porém, o método exige uma matriz OD inicial, denominada matriz semente, que neste estudo foi admitida com elementos iguais ao inverso da distância mínima entre os pontos referentes ao caminho mínimo da rede e com isso fez-se uma matriz OD com estimativa de viagens entre pares OD.

3.3 Simulador SUMO

O SUMO necessita de um arquivo de rede que representa a malha viária de um determinado local. No caso de Curitiba, o arquivo de rede é da região estudada e foi importada do *Open-Street Maps*. O arquivo de mapa (*.osm*) é importado para o SUMO e via prompt de comando e convertido em arquivo de redes do SUMO (*.net.xml*). Conforme ilustrado a seguir.

Figura 12 – Rede de Tráfego no simulador SUMO



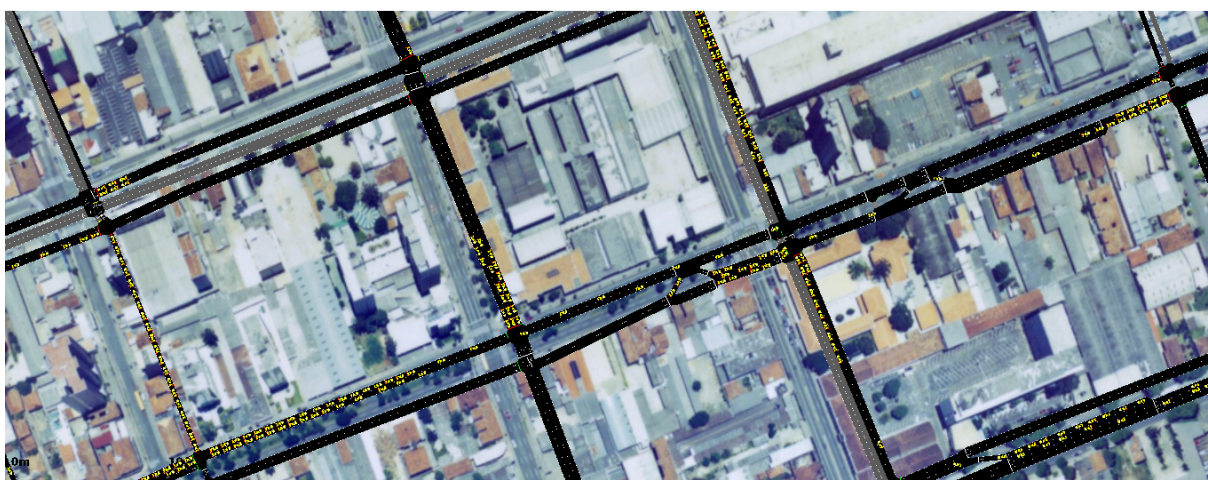
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo método de Fratar foi obtida uma matriz origem-destino com 88209 viagens. Assim foi necessário converter os arquivos para o formato apropriado no SUMO. Além disso, era desejado que ele não apenas alocasse aleatoriamente o tráfego entre os pares OD, mas que também o fizesse de forma dinâmica, como descrito anteriormente, melhor representasse a realidade.

Então foi utilizado a geração de rotas pelo próprio SUMO, através da ferramenta OD2TRIPS, que a partir de dois arquivos: matriz OD(*.od.xml*) e o arquivo de fontes e sumidouros(*.taz.xml*), gera um arquivo de rotas (*.rou.xml*) de menor custo (tempo) e a cada passo de simulação (1 segundo) o SUMO recalcula todas as rotas. Ou seja, aplica o Modelo de Equilíbrio do Usuário.

Na imagem a seguir pode ser visualizada um instante de simulação pelo SUMO em uma região próxima a um shopping center da cidade.

Figura 13 – Simulação de Curitiba - Centro



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram estabelecidos 4 diferentes cenários de simulação em Curitiba. O primeiro cenário é da situação atual, com o corredor de BRT. O segundo cenário simulado foi estabelecido substituindo-se as faixas do BRT por uma faixa por sentido para circulação de automóveis na avenida do corredor de ônibus, a Avenida Sete de Setembro. Para o terceiro cenário foram disponibilizadas as duas faixas para circulação de veículos em um mesmo sentido, do Centro para os bairro Batel, enquanto no cenário 4 foi estabelecido a circulação de veículos no sentido inverso, do bairro Batel para o Centro.

Os arquivos de saída do SUMO analisados foram: *summary* e *tripinfo*. O primeiro fornece um resumo dos dados de saída, incluindo: número de veículos, tempo médio de viagem e o tempo médio de espera por instante de simulação. O segundo, fornece informações em relação a viagem de cada veículo que percorreu o trajeto entre uma origem e um destino, incluindo distância percorrida, duração da viagem, velocidade de saída e velocidade de chegada. Com esses dados é possível analisar estatisticamente a equivalência dos cenários e possíveis efeitos de abertura das faixas de tráfego para automóveis.

3.4 Simulação e Tratamento de Dados

Após executada as simulações é necessário a análise de dados para comparação entre os diferentes cenários. Entretanto dois parâmetros devem ser estabelecidos a priori:

- o tempo de aquecimento da simulação (*warm-up*);
- o número de replicações.

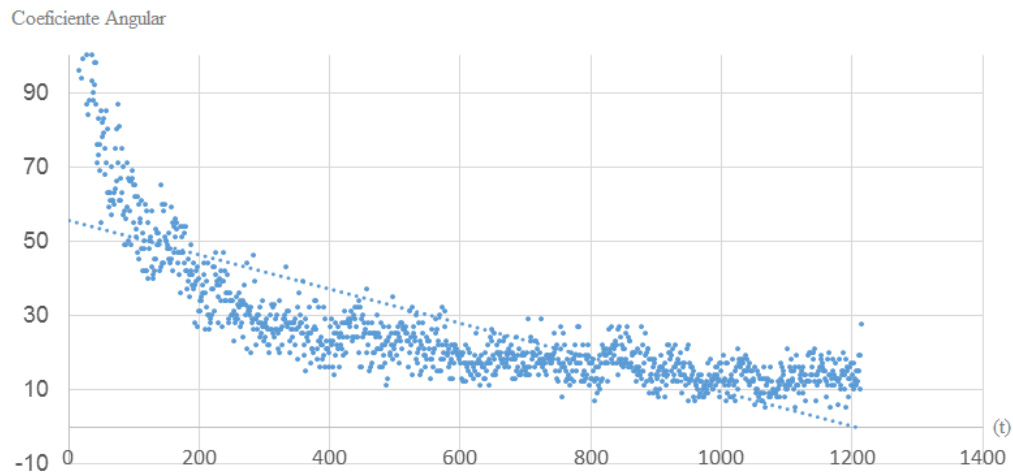
As simulações são bastante complexas do ponto de vista computacional, já que foram constatados a inserção de mais de 50 mil veículos simultaneamente. Como a cada segundo as rotas de todos os veículos devem ser recalculadas cada simulação para um período de 15 minutos de operação do sistema levaria dias. Em um teste realizado para se estabelecer o período de aquecimento foram necessários 7 dias para executar 1200 segundos de simulação.

Devido a essa restrição computacional, foi necessário identificar alternativas para execução das simulações. Nesse sentido, foi possível obter acesso a um computador de alto desempenho disponibilizado pelo Laboratório de Computação Científica da Universidade Federal de Santa Catarina, com 12 núcleos de processamento e 192GB de RAM. Testes preliminares indicam que uma simulação com duração de 3900 segundos exige um tempo real de 25 minutos de processamento, em contraposição aos 7 dias para simular 1200 segundos em um computador convencional.

O tempo de aquecimento de uma simulação, chamado de *warm-up* foi estimado a partir dos coeficientes lineares de uma reta. Os coeficientes foram baseados no número de veículos, no eixo vertical em milhares, e no eixo horizontal o tempo de simulação em segundos, percorrendo a rede de tráfego no decorrer do tempo. Uma regressão linear desses coeficientes foi feita para verificar a diferença entre eles, até se aproximar de 1.

A Figura 14 a seguir mostra a curva de coeficientes angulares. Nota-se que a partir de 200 segundos é formada quase uma reta, já sugerindo que o tempo de *warm-up* é próximo a esse valor.

Figura 14 – Coeficiente angular dos números de veículos na simulação



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dessa análise foi estimada a regressão linear subtraindo determinados tempos de simulação.

Tabela 1 – Regressão linear em relação aos tempos de simulação

Tempo de Simulação (segundos)	Coeficiente de Regressão Linear
0	0,9427
100	0,9713
200	0,9832
300	0,9879

Pela tabela anterior, o tempo de *warm-up* escolhido foi de 300 segundos, pois a partir desse intervalo, o ganho é pequeno em relação ao custo computacional necessário para executar a simulação para um intervalo adicional maior.

Sabendo o tempo de simulação total necessário, dado pelo tempo de *warm-up* mais uma hora de operação ($300 + 3600s$), foi necessário estimar o número de replicações necessárias para cada cenário de simulação. A seguir é demonstrado o procedimento de cálculo para os cenários 1 e 2. O processo é iterativo para cada replicação e os dados exibidos se referem ao Tempo Médio de Espera. O resultado das simulações após 30 replicações gera uma saída de 195 mil dados, que estão sintetizados no exemplo a seguir.

Tabela 2 – Resultados da simulação para cada cenário em relação ao Tempo Médio de Espera

Cenário	Média	Desvio Padrão	Variância
1	404	10	111
2	400	18	312
3	405	24	560
4	390	27	721

A análise de Welch foi utilizada para estimar os graus de liberdade e a equivalência entre cada cenário. Nas fórmulas a seguir o (i) é cada um dos cenários, (s_i^2) é a variância de cada cenário, enquanto o (n_i) é o número de replicações realizadas, que como citado anteriormente foi 30.

$$\frac{s_1^2}{n_1} = 494 \quad (3.1)$$

$$\frac{s_1^2}{n_2} = 3894 \quad (3.2)$$

Com isso, e olhando o valor de (t) de *student* na tabela para o grau de confiança de 95% e 30 replicações, $(t = 2,042)$.

$$g \cdot l = \frac{[s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2]}{[s_1^2/n_1]^2/(n_1 - 1) + [s_2^2/n_2]^2/(n_2 - 1)} = 29,99 \quad (3.3)$$

Nota-se que o valor encontrado foi de 29,99 replicações com comparações a partir do cenário 1, ou seja, foram necessárias 30 replicações para os cenários 1 e 2. O mesmo cálculo foi usado para os outros cenários, e os resultados estão na tabela a seguir.

Tabela 3 – Número de Replicações necessárias para Tempo Médio de Espera

Cenários	Número de Replicações
1 e 2	29,99
1 e 3	25,88
1 e 4	25,14

Pelos resultados da Tabela 3 foram feitas 30 replicações conforme resultado de significância estatística é exigido pelo teste. Agora será mostrado como foi obtido a comparação entre os cenários. A análise de Welch foi detalhada anteriormente, mostrando que fornece o intervalo de confiança. Os valores mínimo e máximo do teste podem agora ser encontrados:

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 \pm t_{d.f., 1-\alpha/2} \cdot \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} = [-0, 24, 0, 15] \quad (3.4)$$

Como o valor 0 está inserido entre os valores $[-0, 24, 0, 15]$, o teste indica que os cenários são estatisticamente semelhantes. Além disso foi realizada uma ANOVA entre todos os cenários.

Os resultados referentes às comparações entre cenários pela aplicação da análise de Welch e da ANOVA são explicados detalhadamente no próximo capítulo.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da simulação dos cenários propostos para a cidade de Curitiba. Foram tratados os arquivos de resumo, que forneceram os dados de número de veículos, tempo de espera em filas e tempo de viagem, além do arquivo de informações de viagens em que constam arco de origem, arco de destino, duração da viagem e comprimento total da viagem. A partir desses dois arquivos, foram estabelecidas três medidas de desempenho: velocidade média, tempo médio de espera e tempo de viagem.

Foram utilizados dados de Curitiba (2014) como referência para validação do modelo, sobre pesquisas de deslocamento com informações de velocidade média, tempo de viagem e tempo de espera em trechos de vias nos 4 bairros de estudo. Em 2014 foi feita uma pesquisa entre as Ruas Alferes Poli e Rua Desembargador Westphalen, sendo estimada uma velocidade média de 18,53 km/h no trecho para diversos horários do dia, e no dia 22 de maio de 2014 entre 18:37h e 18:50, foi estimada uma velocidade de 9,05 km/h no mesmo trajeto. Um outro estudo no anel viário central da cidade o trecho de Rota 1A, entre as ruas Engenheiro Rebouças e Basílio Itiberê resultou em velocidade média de 23,15 km/h e menor valor de 18,53 km/h.

É evidente que essas velocidades médias em apenas dois trechos não refletem a velocidade média nos 4 bairros, entretanto foram os únicos dados comparativos encontrados.

Tabela 4 – Dados majorados da prefeitura de Curitiba

	Velocidade Média km/h	Tempo Médio de Espera segundos	Tempo Médio de Viagem segundos
Dados Medidos	9,05	530	777

Como visto, os dados da prefeitura foram majorados (pior caso medido de cada indicador de desempenho) para que fossem comparados com os modelos de simulação que também foram majorados ao se estabelecer como critério de escolha o pior pico entre manhã e tarde. Com isso a análise estatística somente foi realizada entre cenários.

O cenário 1 trata da situação atual na cidade de Curitiba, com operação do BRT em faixas exclusivas na região central. Um grande problema desse cenário seria sua validação, pois o modelo não representaria de forma fiel a situação. Para isso foi-se em busca de algum dado que pudesse fazer essa comparação, com intuito de

verificar a proximidade do modelo com a realidade, dados os quais foram observados pela prefeitura da cidade.

Parece intuitivo que, com mais faixas liberadas para o tráfego de veículos ocorre necessariamente uma melhoria do tráfego urbano, entretanto esse argumento não é necessariamente verdade, como foi demonstrado por Sheffi (1985) ao analisar as diferenças entre a modelagem de Equilíbrio do Usuário e do ponto de vista de Otimização do Sistema.

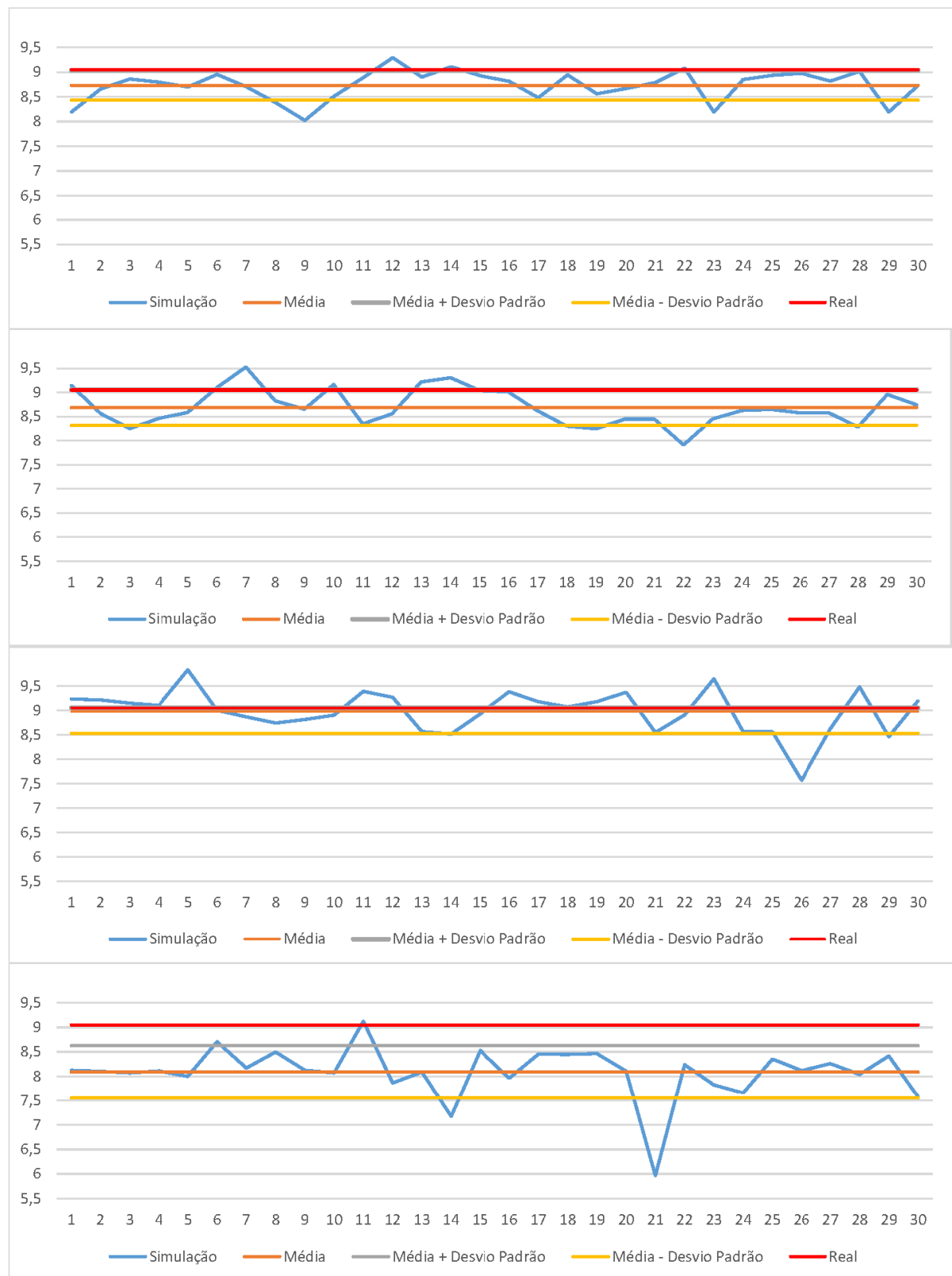
O cenário 2 deste estudo prevê que as duas faixas de ônibus do corredor de BRT são liberadas para o tráfego de veículos individuais cada uma em um sentido. No cenário 3, as duas faixas do corredor de BRT são liberadas para automóveis trafegarem apenas no sentido Centro-Batel. O cenário 4 possui as duas faixas do BRT liberadas para o fluxo de veículos no sentido Bairro-Centro.

O cenário 4 apresentou os resultados mais discrepantes entre todos os cenários, reduzindo a velocidade média consideravelmente em relação aos demais. É necessário uma comprovação estatística, mas esse cenário se destacou negativamente, pois as médias foram menores e tiveram grandes desvios nos resultados das replicações.

Os gráficos a seguir indicam a distribuição de frequência de valores médios observados para os veículos nas 30 replicações dos cenários em relação a velocidade média (Figura 15), tempo médio de espera (Figura 16) e tempo médio de viagem (Figura 17).

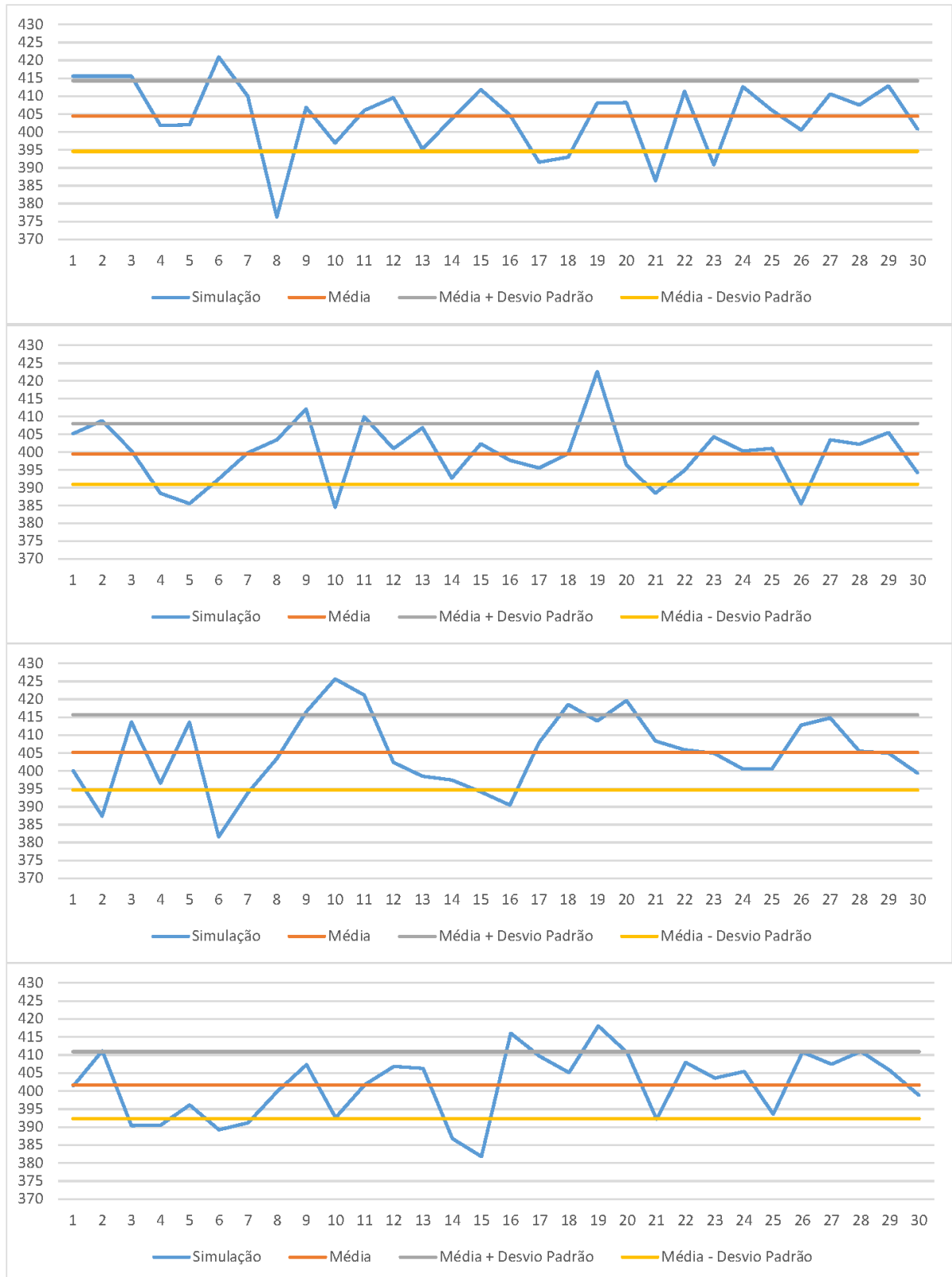
Na Figura 15 no eixo vertical se encontra a velocidade em (km/h), já na Figura 16 o eixo vertical expressa o tempo em segundos e, na Figura 17, o eixo das ordenadas também representa o tempo em segundos. Nas três imagens o eixo horizontal mostra o número da replicação.

Figura 15 – Velocidades Médias de cada cenário em ordem: Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4



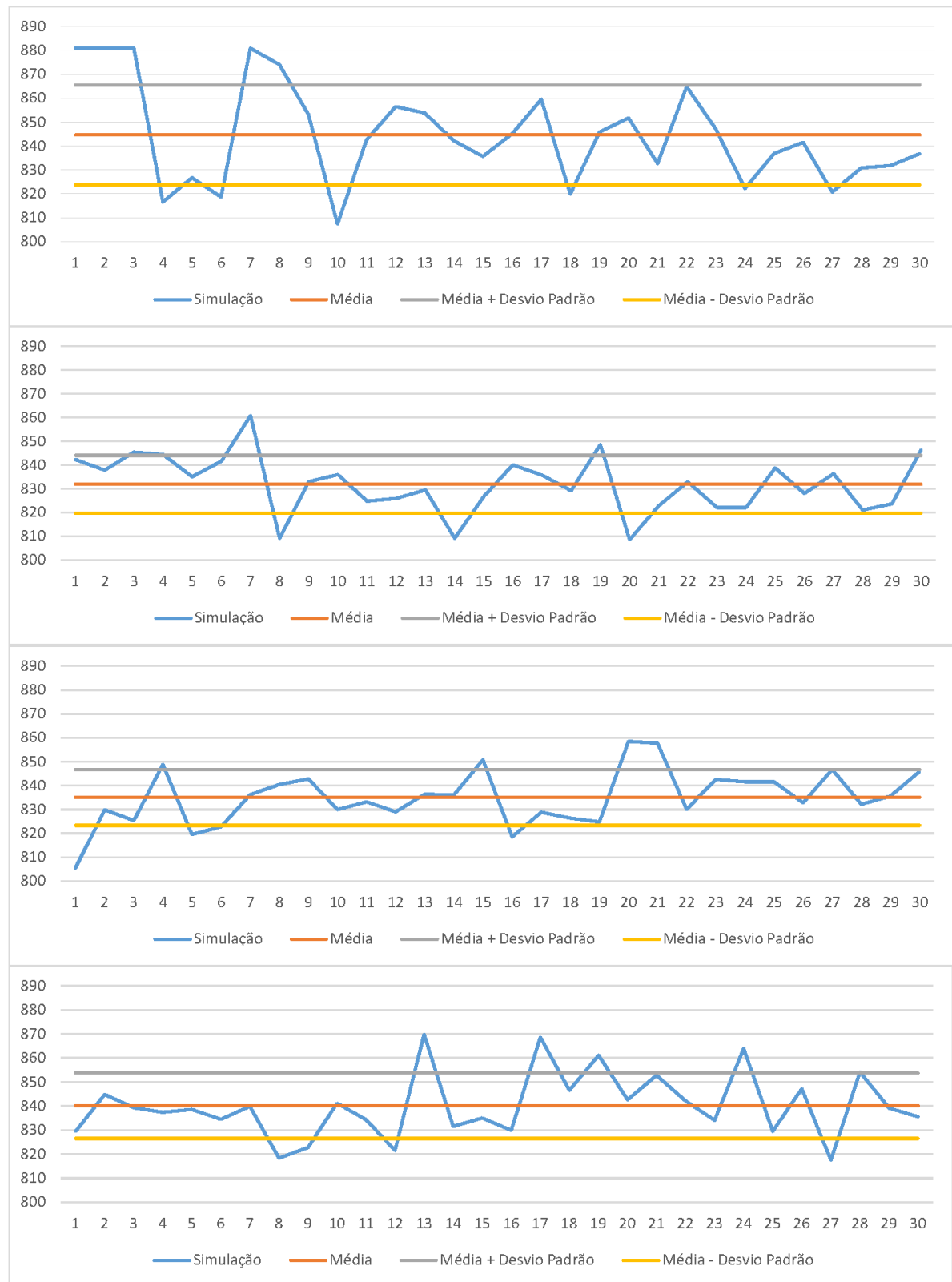
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Tempo Médio de Espera de cada cenário em ordem: Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 – Tempo Médio de Viagem de cada cenário em ordem: Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir se encontram as tabelas com os dados gerados a partir dos gráficos anteriores.

Tabela 5 – Resumo dos dados de Velocidade Média

Velocidade Média (km/h)					
	Observado	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Média	9,05	8,73	8,69	8,98	8,09
Desvio Padrão	-	0,30	0,37	0,45	0,54
Variância	-	0,09	0,14	0,20	0,30

Tabela 6 – Resumo dos dados de Tempo Médio de Espera

Tempo Médio de espera (s)					
	Observado	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Média	530	404	400	405	390
Desvio Padrão	-	10	18	24	27
Variância	-	111	312	560	721

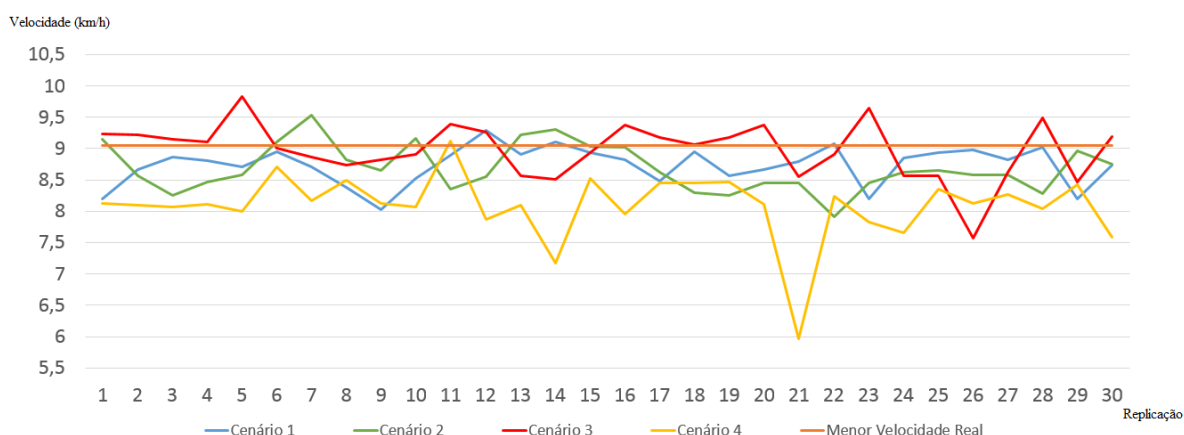
Tabela 7 – Resumo dos dados de Tempo Médio de Viagem

Tempo Médio de viagem (s)					
	Observado	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Média	777	847	832	834	839
Desvio Padrão	-	21	33	29	35
Variância	-	482	1064	829	1252

Nas tabelas anteriores foram inseridos o resumo dos dados encontrados nas simulações. Os valores dos resultados ficaram próximos, entretanto é necessária uma análise estatística para mostrar uma possível semelhança estatística.

A Figura 18 contém o gráfico das velocidades médias, no eixo vertical, e as replicações de cada cenário, no eixo horizontal. Na cor azul o cenário 1, na cor verde o cenário 2, em vermelho o cenário 3, em cor amarela o cenário 4 e em alaranjado a velocidade medida constatada na cidade. Apesar da velocidade do cenário 3 estar em média maior que as demais, é inevitável uma análise mais detalhada, indicada na seção a seguir.

Figura 18 – Velocidades Médias de cada cenário e do obtido pela prefeitura



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Análise de Welch

As comparações pela análise de Welch foram realizadas em relação ao tempo médio de espera dado que exigiu 30 replicações conforme indicado na Tabela 3. O teste não foi aplicado para as demais medidas de desempenho (velocidade média e tempo médio de viagem) pois exigiam maior quantidade de replicações.

Os resultados na tabela a seguir indicam os valores da análise de Welch para diferentes cenários comparados com o primeiro da situação atual de operação do BRT.

Tabela 8 – Análise de Welch em comparação com cenário 1

	Valor Mínimo	Valor Máximo
Cenários 1 e 2	-13	4
Cenários 1 e 3	-233,97	233,97
Cenários 1 e 4	-26	-2

Nessa análise é possível verificar que os cenários 1, 2 e 3 são semelhantes estatisticamente com relação ao Tempo Médio de Espera. Entretanto, os resultados indicam que o Cenário 4, de abertura das faixas de tráfego exclusivamente par circulação de automóveis no sentido Bairro-Centro, é estatisticamente diferente do Cenário 1 sob o ponto de vista daquela medida de desempenho.

Além dessa conclusão sobre a diferença estatística entre cenários, é possível afirmar que o tempo médio de espera no Cenário 4 é menor que no Cenário 1 pois o intervalo entre os valores mínimo e máximo do teste (diferença entre o tempo médio de espera no Cenário 4 e no Cenário 1) compreende apenas valores negativos.

4.2 ANOVA

Como a ANOVA não é limitada pelo número de replicações necessárias, são mostradas todas as comparações entre cenários, inclusive para verificação em relação a análise de Welch para o tempo médio de espera. Assim como na análise de Welch, o nível de significância da estatística F de Fisher foi admitido igual a $\alpha = 0,05$.

Tabela 9 – ANOVA entre os cenários em termos do Tempo Médio de Espera

	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor – P	F_{crit}
Cenários 1 e 2	Entre Grupos	3,16772	1	3,16772	0,033827	0,854716	4,006873
	Dentro dos Grupos	5431,324	58	93,64352			
	Total	5434,492	59				
Cenários 1 e 3	Entre Grupos	7,4267	1	7,42674	0,07145	0,7901	4,006873
	Dentro dos Grupos	6028,057	58	103,9320			
	Total	6035,484	59				
Cenários 1 e 4	Entre Grupos	0,033443	1	0,033443	0,290986	0,591654	4,006873
	Dentro dos Grupos	6,66599	58	0,114931			
	Total	6,699434	59				

Com esses resultados, como a estatística F em todos os casos é menor que F_{crit} chega-se à conclusão de que todos os cenários são iguais estatisticamente do ponto de vista de tempo médio de espera. Apesar da análise de Welch ter indicado que o cenário 4 é diferente, os resultados da ANOVA indicam semelhança entre eles.

A seguir é realizada a mesma análise, mas com relação ao tempo médio de viagem para comparação entre os cenários.

Tabela 10 – ANOVA entre os cenários em termos de Tempo Médio de Viagem

	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor – P	F_{crit}
Cenários 1 e 2	Entre Grupos	1628,189	1	1628,189	3,9414871	0,051685	4,001191
	Dentro dos Grupos	24785,4	58	413,09			
	Total	26413,59	59				
Cenários 1 e 3	Entre Grupos	867,2836	1	867,2836	3,4959	0,0665	4,0068
	Dentro dos Grupos	14388,858	58	248,0837			
	Total	15256,1418	59				
Cenários 1 e 4	Entre Grupos	96,9603	1	96,9603	0,3559	0,5531	4,0068
	Dentro dos Grupos	15800,99	58	272,4309			
	Total	15897,95	59				

As Análises de Variância realizadas mostram que os cenários 1, 2, 3 e 4 são estatisticamente semelhantes do ponto de vista de tempo médio de viagem. Ou seja, em relação à diferença dos tempos de viagem ou de espera dos automóveis na cidade, não faria diferença significativa entre liberar o tráfego para todos os automóveis ou

manter as faixas de BRT fechadas para o tráfego.

Finalmente, as tabelas a seguir indicam os resultados de ANOVA para comparação do Cenário 1 em relação aos demais do ponto de vista da velocidade média dos veículos.

Tabela 11 – ANOVA entre os cenários em termos da Velocidade Média

	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor – P	F_{crit}
Cenários 1 e 2	Entre Grupos	117,4712	1	117,4712	1,2831	0,26196	4,006873
	Dentro dos Grupos	5309,708	58	91,546			
	Total	5427,18	59				
Cenários 1 e 3	Entre Grupos	0,868587	1	0,868587	6,031371	0,017071	4,006873
	Dentro dos Grupos	8,352665	58	0,144011			
	Total	9,221252	59				
Cenários 1 e 4	Entre Grupos	6,247811	1	6,247811	32,81551	$3,8 \times 10^{-7}$	4,006873
	Dentro dos Grupos	11,04274	58	0,190392			
	Total	17,29055	59				

Na comparação entre o Cenário 1 e o Cenário 2 observa-se que há semelhança estatística entre eles em relação à velocidade média. Por outro lado, verifica-se uma diferença estatística entre os cenários 1 e 3, mostrando que o cenário 3 é levemente melhor que o cenário 1 do ponto de vista dessa medida de desempenho do fluxo de tráfego. Entre os cenários 1 e 4 houve diferença com significância pois o valor da estatística F calculada foi maior que F_{crit} .

5 CONCLUSÕES

Os problemas de tráfego urbano abordados neste trabalho em função das medidas de desempenho adotadas e as estratégias de execução do método proposto, sobretudo do ponto de vista de aquisição de dados e implementação do modelo de simulação, indicam que ferramentas de planejamento podem ser utilizadas para análise de alterações na infraestrutura de transporte as quais, por sua vez, impactam na mobilidade das cidades.

Como visto anteriormente os cenários propostos neste trabalho indicaram diferenças estatísticas, mostrando que apenas os cenários 1 e 2 são iguais em relação a todos os indicadores de desempenho, e que os cenários 2, 3 e 4 em relação ao primeiro são semelhantes do ponto de vista de tempo médio de espera e de viagem.

A partir desse argumento é pertinente apresentar uma análise quantitativa em termos absolutos dessas medidas de desempenho para mostrar o quão representativas são as diferenças existentes para os tomadores de decisão no planejamento urbano e como isso impactará os usuários do sistema viário.

Na Tabela 12 é mostrada a diferença em termos absolutos entre cenários, para as medidas analisadas, além dos valores medidos no local de estudo.

Tabela 12 – Valores Absolutos e Percentuais em relação ao cenário 1

	Velocidade Média (km/h)		Tempo Médio de Espera (segundos)		Tempo Médio de Viagem (segundos)	
Cenário 1	8,73	0%	404	0%	847	0%
Cenário 2	8,68	-1%	400	-1%	832	-2%
Cenário 3	8,98	3%	405	0%	834	-2%
Cenário 4	8,09	-7%	390	-3%	839	-1%
Real	9,05	4%	530	31%	777	-8%

Apesar do tráfego urbano da simulação ter sido majorado, os resultados foram próximos, em termos absolutos, da realidade da cidade em seu pior caso.

Como visto na Tabela 12 o único cenário que ocorreu melhora foi no cenário 3, reduzindo o tempo médio de viagem em 13 segundos, o que para efeitos práticos não é muito significativo já que representa apenas 2% de redução de tempo de viagem e estatisticamente não apresenta diferença dentro de um nível de significância $\alpha = 0,05$.

A Tabela 12, também mostra a validação do modelo do cenário 1, simulação da situação atual, com o medido pela prefeitura, pois ocorreu um erro mais expressivo apenas no tempo médio de espera, mostrando que a comparação dos cenários, mesmo

que majorados, quando comparados com uma situação crítica da cidade, os resultados convergem. Obviamente, se a cidade tivesse uma matriz OD real, os resultados seriam mais precisos.

É notório que para uma cidade de grande porte, com tantas possíveis rotas, com fluxos de tráfego expressivos, apenas uma via adicional para veículos não é impactante. Ademais, por estar inserida em uma região chamada de "*zona calma*" com limite de velocidade de 40 km/h, o impacto na liberação das faixas de tráfego do BRT são pouco significativos do ponto de vista de velocidade média dos veículos.

Como sugestão para o município de Curitiba este estudo mostrou poucas diferenças práticas com a substituição do corredor de BRT, eixo *Norte-Sul*, por faixas liberadas para veículos. Caso o município opte pela abertura das faixas de BRT após a construção do sistema metروiário equivalente, o cenário 3 de liberação de veículos do centro para o bairro Batel é a melhor opção.

Entretanto, por não haver uma melhoria significativa entre os cenários, a sugestão é que os administradores do município considerem a utilização das faixas do BRT como infraestrutura alternativa ao fluxo de veículos, como a remodelação para um parque linear para contribuir com a qualidade de vida de seus munícipes, além de possibilitar o fomento ao comércio da região e influenciar o mercado imobiliário.

Como estudos futuros do ponto de vista do tráfego sugere-se:

- Aplicação do mesmo trabalho com uma matriz OD real do município para comparação com o modelo realizado a partir das contagens de tráfego;
- Aplicação de modelo analítico de alocação de tráfego sob a perspectiva de Equilíbrio do Usuário e Otimização do Sistema para comparação com o modelo simulado neste trabalho;
- Estudos mais detalhados sobre requalificação urbana e seus impactos;
- Análise de dados mais recentes e uma possível maior quantidade de pontos de contagem para definição de uma matriz OD mais realista.

REFERÊNCIAS

- BAIRD, S. P.; LEAVY, J. J. Simulation modeling using promodel for windows. In: IEEE. **Simulation Conference Proceedings, 1994. Winter**. [S.l.], 1994. p. 527–532.
- BANDO, M. et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. **Physical Review E**, APS, v. 51, n. 2, p. 1035, 1995.
- BERTONCINI, B. V. **Uma proposta de estimação da matriz OD a partir dos fluxos de tráfego observados nas interseções da rede de transportes**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós Graduação de Engenharia de Transportes na Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2010.
- BIDERMAN, C. Infra-estrutura de transporte urbano de são paulo. **Urban Age. Newspaper essay, South América**, 2008.
- BONSALL, P.; PALMER, I. Modelling drivers' car parking behaviour using data from a travel choice simulator. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier, v. 12, n. 5, p. 321–347, 2004.
- BURGESS, C.; ORDIZ, S. Exploring the brt systems of curitiba and bogota. 2010.
- CAMPOS, V. B. G. Planejamento de transportes: conceitos e modelos. **Rio de Janeiro: Interciência**, 2013.
- CHANDLER, R. E.; HERMAN, R.; MONTROLL, E. W. Traffic dynamics: studies in car following. **Operations research**, Inform, v. 6, n. 2, p. 165–184, 1958.
- CHIU, Y.-C. et al. Dynamic traffic assignment: a primer. **Transportation Research E-Circular**, n. E-C153, 2011.
- CHUNG, C. A. **Simulation modeling handbook: a practical approach**. [S.l.]: CRC press, 2003.
- COELHO, E. C. **Avaliação dos níveis de congestionamento em vias arteriais com a utilização da micro-simulação**. 2009. Tese (Doutorado) — Dissertação de M. Sc., Programa de Pós-graduação Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- CURITIBA, P. M. de. Região metropolitana. **Prefeitura Municipal. Curitiba**, 2014.
- DNIT. Manual de estudos de tráfego. **Ministério dos Transportes**, 2006.
- EDIE, L. C. Car-following and steady-state theory for noncongested traffic. **Operations Research**, INFORMS, v. 9, n. 1, p. 66–76, 1961.
- FARINHA, P. M. L. **Modelos de simulação em MATSim aplicados à análise de sistemas de transportes**. Tese (Doutorado) — Dissertação de M. Sc., Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.

- FÉLIX, R. Curitiba registra 134km de lentidão no trânsito. **Jornal Gazeta do Povo**, 2013. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/curitiba-registra-134-km-de-lentidao-no-transito-3u1484hp61diga4a7ovwyo0a3>>.
- FRANKLIN, R. On the flow–concentration relationship for traffic. In: **Proc. 2nd Int. Symp. Theory Road Traffic Flow**. [S.l.: s.n.], 1965. p. 120–128.
- GAZIS, D. C.; HERMAN, R.; ROTHERY, R. W. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. **Operations research**, INFORMS, v. 9, n. 4, p. 545–567, 1961.
- GIPPS, P. G. A behavioural car-following model for computer simulation. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 15, n. 2, p. 105–111, 1981.
- GREENBERG, H. An analysis of traffic flow. **Operations research**, INFORMS, v. 7, n. 1, p. 79–85, 1959.
- HARRELL, C.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. O. Simulation using promodel. Boston: McGraw-Hil, 2011.
- HAZELTON, M. L. Inference for origin–destination matrices: estimation, prediction and reconstruction. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 35, n. 7, p. 667–676, 2001.
- IBGE. Instituto brasileiro de geografia e estatística. **IBGE Cidades**, 2015.
- IPPUC. **Metrô de Curitiba**. 2016. Disponível em: <<http://metro.curitiba.pr.gov.br>>.
- IPPUC. **Pesquisas Primárias Contagens de Tráfego**. 2016. Disponível em: <<http://www.ippuc.org.br/>>.
- JARDIM, R. M. **Revitalização de espaços urbanos ociosos como estratégia para a sustentabilidade ambiental: o caso do High Line Park no contexto do PlaNYC**. Tese (Doutorado) — Dissertação, M.Sc do Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Pontfícia Universidade Católica - Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- KAPARIAS, I.; BELL, M.; TOMASSINI, M. Key performance indicators for traffic management and intelligent transport systems. **ISIS**, v. 14, n. 06, 2011.
- KERNER, B. S.; KONHÄUSER, P. Cluster effect in initially homogeneous traffic flow. **Physical Review E**, APS, v. 48, n. 4, p. R2335, 1993.
- KOEHLER, L. A.; CAMPONOGARA, E.; KRAUS JUNIOR, W. Modelo e controle da operação de um sistema BRT com segmento de faixa exclusiva única bidirecional. **TRANSPORTES**, v. 19, n. 3, p. 12–17, 2011.
- KRAJZEWICZ, D. et al. Sumo (simulation of urban mobility)-an open-source traffic simulation. In: **Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM20002)**. [S.l.: s.n.], 2002. p. 183–187.
- KRAUSS, S. **Microscopic modeling of traffic flow**: Investigation of collision free vehicle dynamics. Tese (Doutorado) — Dissertation zur Erlangung des Doktorgades der Matematish - Naturwissenschaftlichen at Fakult der Universitat zu Koln, Colônia, Alemanha, 1998.

KUHNE, R. D. Foundations of traffic flow theory i: Greenshields' Legacy–Highway Traffic. In: **Symposium on the Fundamental Diagram:75 Years** (Greenshields 75 Symposium). [S.l.: s.n.], 2008.

KUTZ, M. Handbook of transportation engineering. myer kutz assoc. **Inc.**, pages, p. 8–1, 2004.

LIGHTHILL, M. J.; WHITHAM, G. B. On kinematic waves. ii. a theory of traffic flow on long crowded roads. In: THE ROYAL SOCIETY. **Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. [S.l.], 1955. v. 229, n. 1178, p. 317–345.

MICHAELS, R.; COZAN, L. Perceptual and field factors causing lateral displacement. **Highway Research Record**, n. 25, 1963.

NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M. A cellular automaton model for freeway traffic. **Journal de physique I**, EDP Sciences, v. 2, n. 12, p. 2221–2229, 1992.

NORTH, M. J.; MACAL, C. M. **Managing business complexity**:discovering strategic solutions with agent-based modeling and simulation. [S.l.]: Oxford University Press, 2007.

DIOS ORTÚZAR de; WILLUMSEN, L. G. **Modelling transport**. [S.l.]: Wiley New Jersey, 2011.

PAYNE, H. J. Freflo: A macroscopic simulation model of freeway traffic. **Transportation Research Record**, n. 722, 1979.

PIPES, L. A. An operational analysis of traffic dynamics. **Journal of applied physics**, AIP Publishing, v. 24, n. 3, p. 274–281, 1953.

PORTUGAL, L. d. S. **Simulação de tráfego**: Conceitos e Técnicas de Modelagem. [S.l.]: Interciência, 2005.

POYARES, C. Critérios para análise dos efeitos de políticas de restrição ao uso de automóveis em áreas centrais. **Rio de Janeiro, RJ–Brasil**, 2000.

REKERSBRINK, A. Verkehrsflussimulation mit hilfe der fuzzy-logic und einem konzept potentieller kollisionszeiten. **Schriftenreihe des Instituts Fuer Verkehrswesen der Universitaet Karlsruhe**, n. 51, 1994.

RESENDE, P. T. V. d.; SOUSA, P. R. d. Mobilidade urbana nas grandes cidades brasileiras: um estudo sobre os impactos do congestionamento. **SIMPOI–Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais, Fundação Getúlio Vargas**, 2009.

RODRIGUES, F. L. et al. Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, SciELO Brasil, v. 28, n. 2, p. 247–256, 2004.

RUSSELL, S.; NORVIG. Intelligence, artificial: A modern approach. **Artificial Intelligence. Prentice-Hall, Egnlewood Cliffs**, Citeseer, v. 25, 1995.

SCHADSCHNEIDER, A. et al. **Traffic and Granular Flow'05**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.

SHEFFI, Y. **Urban transportation networks**. [S.l.]: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.

SILVA, A. J. M. **Implementação de um Algoritmo Genético utilizando o modelo de ilhas**. Tese (Doutorado) — Dissertação de M. Sc., Programa de Pós-graduação Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

SILVA, F. C. d. Estudo de viabilidade técnico-econômica com solução de engenharia para o elevado costa e silva – minhocão. Universidade Anhembi Morumbi, 2007.

SILVA, G. A. d.; SANT'ANNA, J. A. Análise dos aspectos qualitativos de vis exclusivas em sistemas modernos de Ônibus. **Caminhos de Geografia**, v. 7, n. 18, p. 47–63, 2006.

SILVA, P. C. M. da. **Engenharia de Tráfego Teoria do Fluxo de Tráfego**. 2007. Disponível em: <<http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/teoria-do-fluxo-de-trafego.pdf>>.

SMALL, B. **O maior ônibus do mundo é brasileiro e abre semáforos por sensor**. [S.l.]: Tecmundo, 2011.

SONG, J. et al. Research on car-following model based on sumo. In: IEEE. **Advanced Infocomm Technology (ICAIT), 2014 IEEE 7th International Conference on**. [S.l.], 2014. p. 47–55.

SUN, R. **Cognition and multi-agent interaction: From cognitive modeling to social simulation**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006.

TRISOTTO, F. Após 40 anos, brt dá sinais de cansaço em curitiba. **Jornal Gazeta do Povo**, 2014. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/apos-40-anos-brt-da-sinais-de-cansaco-em-curitiba-ebd0v31ocoigpl8fb7l6qxa32>>.

VANDERSCHUREN, M. J. W. A. **Intelligent transport systems for South Africa: impact assessment through microscopic simulation in the South African context**. [S.l.]: University of Twente, 2006.

WIEDEMANN, R. Simulation des strassenverkehrsflusses. 1974.

WIKIPEDIA. **Rede Integrada de Transporte Linha Verde**. 2013. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Rede_Integrada_de_Transporte>.

WILLUMSEN, L. Simplified transport models based on traffic counts. **Transportation**, Springer, v. 10, n. 3, p. 257–278, 1981.

WRIGHT, L.; HOOK, W. Manual de brt: guia de planejamento. **Brasília: [sn]**, 2007.

YUKAWA, S.; KIKUCHI, M. Coupled-map modeling of one-dimensional traffic flow. **Journal of the Physical Society of Japan**, The Physical Society of Japan, v. 64, n. 1, p. 35–38, 1995.